



Pedro Duarte Gomes Tostes

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE FROTA
DA GRADE DE CARGA GERAL PARA APLICAÇÃO EM
UMA CONCESSIONÁRIA DO SETOR FERROVIÁRIO**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. José Eugênio Leal
Coorientador: Prof. Fernando Marques de Almeida Nogueira

Rio de Janeiro,
janeiro 2022



Pedro Duarte Gomes Tostes

**METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO
DE FROTA DA GRADE DE CARGA GERAL
PARA APLICAÇÃO EM UMA CONCESSIONÁ-
RIA DO SETOR FERROVIÁRIO**

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

Prof. José Eugenio Leal

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Fernando Marques de Almeida Nogueira

Coorientador

UFJF

Prof. Luciana de Souza Pessoa

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Orivalde Soares da Silva Junior

IME

Rio de Janeiro, 14 de janeiro de 2022

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

Pedro Duarte Gomes Tostes

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2008. Especializou-se em Transporte Ferroviário de Cargas pelo Instituto Militar de Engenharia em 2017. Atua desde 2007 numa ferrovia concessionária brasileira especializada no transporte de cargas.

Ficha Catalográfica

Tostes, Pedro Duarte Gomes

Metodologia para dimensionamento de frota da grade de carga geral para aplicação em uma concessionária do setor ferroviário / Pedro Duarte Gomes Tostes ; orientador: José Eugênio Leal ; coorientador: Fernando Marques de Almeida Nogueira. – 2022.

53 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2022.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial - Teses. 2. Problema de alocação de locomotivas. 3. Dimensionamento de frota. 4. Planejamento de locomotivas. 5. Grade de trens de carga geral. 6. Otimização. I. Leal, José Eugênio. II. Nogueira, Fernando Marques de Almeida. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

Para Dona Fátima, minha estrela-guia.
Para Mariana, Luana e João Pedro, sem os quais
nada faz sentido ou tem propósito.

Agradecimentos

Às instituições, PUC-Rio e UFJF pela oportunidade e por iniciativa tão necessária ao desenvolvimento acadêmico nacional.

Ao orientador, Professor José Eugênio Leal, por todo o suporte oferecido de maneira tão serena. Por toda paciência e por acreditar no potencial, muito obrigado.

Ao coorientador, Professor Fernando Marques de Almeida Nogueira, por cada orientação e paciência no desenvolvimento do trabalho.

À Mariana e às crianças, Luana e João Pedro, por serem minha inspiração, acima de qualquer outra motivação e até quando estas não são mais suficientes.

Aos familiares, pais, irmãos, de sangue ou agregados e sogros, que direta ou indiretamente contribuíram para levar o projeto até o fim. A vida não teria graça sem vocês.

Aos colegas de jornada, por todo apoio e experiências trocadas nesse período de estudos compartilhados.

Aos colegas ferroviários, cuja paixão e companheirismo tornam o ambiente tão rico e colaborativo.

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

Resumo

Tostes, Pedro Duarte Gomes; Leal, José Eugênio (orientador); Nogueira, Fernando Marques de Almeida (coorientador). **Metodologia para dimensionamento de frota da grade de carga geral para aplicação em uma concessionária do setor ferroviário**. Rio de Janeiro, 2022. 53p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A matriz brasileira de transporte retrata a dominância rodoviária sobre os demais modais, na movimentação de cargas no país. O aumento da eficiência operacional e redução de custos é fator que pode elevar a participação e competitividade dos trens nesse contexto. A aplicação de técnicas de otimização no processo de dimensionamento e planejamento operacional da frota de locomotivas possui grande potencial de economia de recursos, principalmente devido aos seus elevados custos de aquisição e manutenção. O presente trabalho apresenta uma metodologia para obtenção de uma solução exata para um horizonte mensal de planejamento, aproveitando-se do caráter cíclico da grade de formação dos trens de carga geral, para definir o tamanho ótimo da frota necessário ao seu adequado funcionamento. A metodologia, implementada em linguagem Python e aplicada em um cenário de uma grade conhecida, teve sua frota resultante comparada com o dimensionamento manual realizado em uma concessionária brasileira e foi capaz de indicar a redução de 2 locomotivas no planejamento de frota. Associada a esta redução, a economia de capital estimada seria entre 400 mil reais e 20 milhões de reais, para o cenário conservador de economia dos gastos de manutenção e para o cenário mais otimista evitando a aquisição de novas locomotivas. Além da redução de frota e aumento na competitividade tarifária dos trens de carga geral, a metodologia cria, por meio de critérios científicos, diretrizes objetivas para o processo de dimensionamento e planejamento da frota de locomotivas, em substituição ao processo empírico atualmente aplicado na referida concessionária.

Palavras-chave

Problema de alocação de locomotivas; Dimensionamento de frota; Planejamento de locomotivas; Grade de trens de carga geral; Otimização.

Abstract

Tostes, Pedro Duarte Gomes; Leal, José Eugênio (advisor); Nogueira, Fernando Marques de Almeida (co-advisor). **Methodology for sizing the general cargo grid fleet for application in a concessionaire in the railway sector**. Rio de Janeiro, 2022. 53p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Brazilian transport matrix presents the road dominance over other modes in the movement of cargo in the country. The increase in operational efficiency and cost reduction is a factor that can increase the participation and competitiveness of trains in this context. The application of optimization techniques in the process of dimensioning and operational planning of the locomotive fleet has great potential for saving resources, mainly due to its high acquisition and maintenance costs. This work presents a methodology to obtain an exact solution for a monthly planning horizon, taking advantage of the cyclical character of the general freight trains timetables, and defining the optimum fleet size necessary for its proper functioning. The methodology, implemented in Python language and applied in a scenario of a defined timetable, had its resulting fleet compared with the manual sizing process carried out in a Brazilian dealership and was able to indicate the reduction of 2 locomotives in the fleet planning. Associated with this reduction, the estimated capital savings would be between 400 thousand reais and 20 million reais, for the conservative scenario of savings in maintenance costs and for the more optimistic scenario avoiding the acquisition of new locomotives. In addition to reducing the fleet and increasing the tariff competitiveness of general freight trains, the methodology creates, through scientific criteria, objective guidelines for the process of dimensioning and planning the locomotive fleet, replacing the empirical process currently applied in the aforementioned concessionaire.

Keywords

Locomotive allocation problem; Fleet dimensioning; Locomotive planning; General freight train grid; Optimization.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 MOTIVAÇÃO	13
1.2 O TRANSPORTE FERROVIÁRIO	15
1.3 RECURSOS ENVOLVIDOS NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO	15
1.4 TIPOS DE TRANSPORTE	16
1.5 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	17
1.6 OBJETIVOS DO TRABALHO	17
1.6.1 OBJETIVO PRINCIPAL	17
1.6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.7 METODOLOGIA DE PESQUISA	18
1.8 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 PROBLEMAS DE ALOCAÇÃO DE LOCOMOTIVAS	19
3 METODOLOGIA	26
3.1 METODOLOGIA GERAL	26
3.2 REPRESENTAÇÃO DA MALHA	26
3.2.1 CARÁTER CÍCLICO DA GRADE DE TRENS DE CARGA GERAL	27
3.3 DEFINIÇÃO DOS MOVIMENTOS VIÁVEIS NA MATRIZ ESPAÇO-TEMPO	29
3.4 DEFINIÇÃO DA DEMANDA MÍNIMA PARA ATENDIMENTO DA GRADE DE TRENS	32
3.5 PRECIFICAÇÃO DOS CUSTOS DE MOVIMENTAÇÃO ATRAVÉS DOS ARCOS	33
3.5.1 AQUISIÇÃO E DEPRECIÇÃO DE LOCOMOTIVAS	34
3.5.2 CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS PARA TRAÇÃO (DIESEL)	34
3.5.3 MANUTENÇÃO DE LOCOMOTIVAS	34
3.5.4 TRIPULAÇÃO DOS TRENS	35
3.6 MODELO MATEMÁTICO	36
4 APLICAÇÃO – DIMENSIONAMENTO DE UMA GRADE CONHECIDA	38
4.1 DETALHAMENTO DO PROBLEMA	38
4.2 A GRADE UTILIZADA	39

4.3 A FROTA UTILIZADA	39
4.4 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO.....	39
4.5 TEMPO DE PROCESSAMENTO.....	41
4.6 RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO.....	41
5 CONCLUSÃO.....	42
Referências bibliográficas	44
Anexos	47

Lista de Siglas

ANTF	- Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários
LAP	- Locomotive assignment problem
LSP	- Locomotive scheduling problem
Hp	- Horse power
SBC	- Sistema à base de conhecimento
SR-4	- Superintendência Regional de São Paulo
RFFSA	- Rede Ferroviária Federal Sociedade Anônima
AMV	- Aparelho de mudança de via
SF	- Super-Fonte, o mesmo que nó de suprimento
SD	- Super-Depósito, o mesmo que nó de demanda
MTKB	- Milhar de tonelada-quilômetro bruto
TB	- Tonelada bruta
TKB	- Tonelada-quilômetro bruto
Gb	- Gigabyte, unidade de medida
RAM	- Random access memory, identificação do tipo de memória

Lista de Figuras

FIGURA 1: COMPARAÇÃO DAS MATRIZES DE TRANSPORTE DE CARGA	13
FIGURA 2: GRADE DE TRENS HIPOTÉTICA CONTENDO DOIS TRENS	17
FIGURA 3: ADAPTAÇÃO DE TRECHO DE FERROVIA AMERICANA.....	27
FIGURA 4: REPRESENTAÇÃO DA GRADE DO TREM DE MAIOR TEMPO DE VIAGEM.	28
FIGURA 5: DEFINIÇÃO DA DEMANDA DE REGIME DO TREM EXEMPLO	28
FIGURA 6: EXEMPLO DE MATRIZ DE VIZINHANÇA.....	29
FIGURA 7: EXEMPLO DE MATRIZ DOS TEMPOS DE VIAGEM	30
FIGURA 8: REDE ESPAÇO-TEMPO DO EXEMPLO DE TRECHO DA FERROVIA AMERICANA	31
FIGURA 9: RECORTE DA REDE ESPAÇO-TEMPO	32
FIGURA 10: EXEMPLO MÍNIMO DE SEQUENCIAMENTO DE TRENS.....	33
FIGURA 11: TELA DO SOFTWARE SPYDER MOSTRANDO PARTE DO CODIGO FONTE	40
FIGURA 12: REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO FLUXO ÓTIMO DE LOCOMOTIVAS.....	40
FIGURA 13: REPRESENTAÇÃO DE UMA REDE DE ARCOS DIRECIONADOS	47
FIGURA 14: EXPANSÃO DA REDE AO LONGO DO TEMPO	49

Lista de Tabelas

TABELA 1: COMPARATIVO DE ALGUNS DOS TRABALHOS CITADOS.....	25
TABELA 2: TEMPOS MÉDIOS DE PROCESSAMENTO.....	41
TABELA 3: PAPÉIS DOS COMPONENTES DE UMA REDE.	47

1 Introdução

1.1 Motivação

O modal ferroviário possui uma alta representatividade nas matrizes de transporte de carga em alguns países do mundo. Alta eficiência energética, baixos níveis de emissões atmosféricas, menores taxas de acidentes e de roubo de cargas são alguns dos fatores que tornam a ferrovia mais competitiva do que outros modos de transporte.

O Brasil, conforme dados publicados pela Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF 2020), é altamente dependente do transporte rodoviário, com ampla maioria das movimentações de carga realizadas.

COMPARAÇÃO DE MATRIZES DE TRANSPORTE DE CARGA
PAÍSES DE MESMO PORTE TERRITORIAL

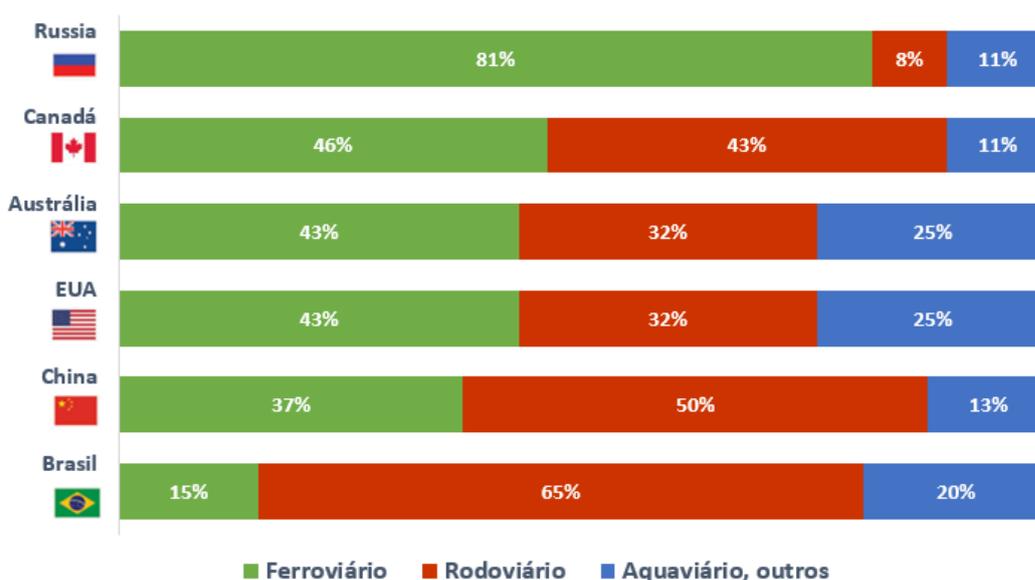


Figura 1: Comparação das matrizes de transporte de carga. Fonte: ANTF(2020).

As ferrovias, normalmente dependem de altos investimentos em infraestrutura, durante seu processo de implantação, para criação de um perfil de via adequado. Entretanto, podem apresentar grande competitividade devido sua eficiência energética e menor nível de emissão de gases de efeito estufa, em comparação com outros modais, sobretudo na movimentação de grandes volumes através de grandes distâncias.

Tipicamente, malhas ferroviárias são formadas por pátios, que são conjuntos de linhas e aparelhos de mudança de via (dotadas ou não de estações) interligados por linhas ao longo de uma extensão definida. No transporte de cargas, os terminais de carga, descarga ou transbordo ligados a pátios tornam possível a

entrada e saída de vagões com seus vários produtos. De maneira análoga, estações de embarque e desembarque de passageiros precisam estar conectados à malha para viabilizar o transporte de pessoas.

Toda composição ferroviária precisa ser formada com, pelo menos, um veículo trator (carro dotado de capacidade propelente, responsável por rebocar ou empurrar os demais veículos da composição). Estes veículos, ou equivalentes, são responsáveis pela movimentação da composição entre dois pontos da malha.

Este papel é comumente desempenhado pelas locomotivas, equipamentos eletromecânicos que podem custar uma dezena de milhões de reais para aquisição, figurando entre os equipamentos mais caros de uma ferrovia, junto com alguns equipamentos de manutenção de via. Mas devido à necessidade de utilização de inúmeras locomotivas, a escala de dimensionamento torna o custeio de aquisição muito expressivo.

A otimização matemática já foi objeto de inúmeros estudos ferroviários, sob diferentes abordagens, com objetivo de aumentar as taxas de utilização de recursos de custo elevado. Neste sentido, este trabalho apresenta interesse na utilização da frota de locomotivas.

É desejável, em qualquer processo produtivo, manter elevadas taxas de utilização dos equipamentos essenciais, sobretudo daqueles de elevado custo de aquisição e manutenção, podendo ser significativo para o custeio das empresas, o impacto do processo de planejamento desta utilização.

Tomando por base uma concessionária do setor ferroviário de cargas brasileiro, os planos operacionais são construídos de maneira manual e altamente dependentes da capacitação e experiência de seus elaboradores. São realizados sem o suporte de ferramentas de otimização, que possam garantir os níveis adequados de utilização da frota de locomotivas.

Processos estritamente manuais de avaliação de cenários, como a construção dos planos de utilização da frota de locomotivas desta concessionária, tendem a ser incompatíveis com os prazos de tomada de decisão e comportamento altamente dinâmico dos mesmos, principalmente quando o número de cenários cresce.

Associado a isso, uma visão relativamente dicotômica dos métodos tradicionais de abordagem do problema de otimização da utilização de locomotivas (entre um modelo excessivamente simplificado que seja tratável frente a um modelo realístico que depende de procedimentos heurísticos para obter uma solução dentro do limite de tempo estabelecido), tornam a dimensionalidade do problema uma questão crítica.

Neste sentido, aplicações capazes de definir o cenário ótimo, através da utilização de modelos matemáticos robustos podem gerar economias significativas, para qualquer operador ferroviário, bem como aumentar o nível de serviço operacional oferecido, desdobrados dos processos de planejamento, alocação e utilização da frota de locomotivas.

Definir de maneira otimizada o tamanho mínimo da frota necessária, reduzindo as taxas de ociosidade das locomotivas, encontrar as combinações mais eficientes para uma frota heterogênea e planejar otimamente as paradas para abastecimento e manutenções preventivas são respostas desejáveis para a maioria dos gestores de frota de locomotivas de qualquer ferrovia.

Como restrição de escopo, o levantamento de trabalhos será restrito aos problemas de alocação de locomotivas para trens de carga, apesar de algumas abordagens poderem ser aplicáveis também para problemas envolvendo o transporte de passageiros.

1.2

O transporte ferroviário

De acordo com Borba (2006) uma ferrovia é tipicamente formada por uma via permanentemente instalada sobre uma plataforma e constituída de trilhos de aço. Apoiados sobre estes trilhos, e guiados por rodas de aço dotadas de frisos, circulam os veículos ferroviários, que interligados através de engates constituem os trens.

Na operação ferroviária os trens circulam através de rotas pré-estabelecidas em seus itinerários, respeitando as velocidades de circulação permitidas em cada trecho e mantendo uma distância segura de outras composições. Ao longo do percurso, até a chegada ao seu destino, podem ser realizadas paradas em pátios e estações ferroviárias para realização de atividades específicas.

Os sistemas de sinalização ao longo do trecho possuem papel fundamental na segurança operacional, garantindo o distanciamento entre composições e sua segurança durante a movimentação dos veículos (com o objetivo de impedir que os veículos circulem de encontro uns aos outros).

Pátios ferroviários são localizações dotadas de pelo menos uma linha secundária além das linhas de circulação, onde veículos e composições possam ser estacionados e processados. Segundo Assad (1980) a principal função de um pátio típico é reorganizar os veículos do fluxo de circulação, formando novos trens a partir dos blocos de vagões que ali chegarem e que circularão juntos até os seus respectivos destinos (ou ao menos até o próximo pátio de organização).

Numa viagem típica de um trem de carga, vagões visitam pátios de classificação como pontos intermediários entre as estações de origem e destino. Dessa forma, as atividades de um pátio consistem, em sua maioria, no processo de separação e agrupamento de veículos com destinos semelhantes, para formação de novos trens.

Os pátios possuem papéis variados na operação ferroviária, de acordo com a natureza das atividades ali realizadas, podendo servir como ponto de reorganização de blocos e formação de novos trens, como ponto de cruzamento ou ultrapassagem de trens (pátios de grande importância para o centro de controle da circulação) ou mesmo como pontos de estacionamento de composições suportando as trocas de lotes de um ou mais terminais e oficinas.

Segundo Assad (1980) os pátios assumem o papel dos nós, na representação da uma malha ferroviária através de grafos, sendo as linhas a representação das ligações entre eles (linhas ferroviárias singelas ou não). Ressalta ainda o papel das *timetables*, nas políticas de utilização das linhas. São tabelas que fornecem os horários de partida e chegada dos trens para cada pátio de seus respectivos itinerários, onde estejam previstas atividades a serem realizadas. Trata-se da definição do que é chamado neste trabalho como grade de trens.

1.3

Recursos envolvidos no transporte ferroviário

Um trem típico é formado pelo acoplamento de veículos ferroviários: locomotivas e vagões (carros de variados tipos e modelos utilizados para transportar cargas ou pessoas).

Os trens precisam, de maneira geral, de uma tripulação responsável pela operação do carro propelente, papel este desempenhado pelos maquinistas e seus auxiliares.

A sinalização é um recurso de grande importância no transporte ferroviário, cujo objetivo é garantir a segurança na movimentação dos trens, controlando o

fluxo de circulação das composições com espaçamento (*headway*) eficiente e seguro.

Terminais ferroviários são responsáveis pela conexão da ferrovia com os seus usuários, seja nos processos de carga e de descarga dos vagões de carga seja nos terminais de embarque e desembarque de passageiros.

O centro de controle possui papel chave em qualquer ferrovia, sendo responsável pela gestão da circulação das composições, licenciando cada uma ao longo do seu percurso e lidando com as intercorrências que permeiam a operação.

Equipes de pátios e terminais são responsáveis pelas atividades realizadas nos pátios de manobra e durante os processos de carga e descarga de alguns terminais. São denominados agentes de estação, manobreadores ou oficiais de manobra, de acordo com a terminologia específica de cada ferrovia.

O transporte ferroviário depende do suporte de áreas de manutenção para garantir níveis controlados de quebras e falhas, tanto de veículos quanto de equipamentos, além da via permanente e sistemas de sinalização e telecom.

1.4

Tipos de transporte

As ferrovias podem ser categorizadas, de acordo com a natureza do seu transporte e formação de trens, que podem ser exclusivamente de carga, exclusivamente de passageiros ou mistos, onde veículos de carga são agrupados aos de passageiros.

Tomando como base o modelo operacional praticado por uma concessionária do setor ferroviário brasileiro, cujos esforços se concentram no transporte de cargas, é importante definir alguns conceitos antes de explanar sobre o problema a ser resolvido.

A maior parte do volume de trens em circulação pode ser enquadrada em uma de duas categorias principais: trens unitários (aqueles formados por grandes lotes de vagões, que podem ou não ser de um mesmo tipo e podem ou não atender a único cliente), que circulam normalmente sem grandes alterações em sua composição ao longo da viagem, parando o estritamente entre as estações de origem e destino; e trens de carga geral (aqueles formados por lotes menores de vagões, comumente de tipos diferentes e atendendo a diversos clientes ao mesmo tempo), que circulam com um planejamento de paradas mais numerosas e contemplando diversas alterações em sua composição.

Este modelo operacional para os trens de carga geral é bastante característico da empresa ferroviária objeto deste trabalho, podendo divergir significativamente quando comparado com o modelo praticado por outras empresas do ramo.

Além das diferenças no que tange o modelo de formação dos trens, é importante diferenciar dois modos de operação encontrados nesta empresa: os chamados “trens de ciclo” operam obedecendo às programações baseadas na duração planejada de cada atividade e etapa do processo, enquanto os trens de grade operam obedecendo a uma tabela de programação – grade de trens - que delimita os horários de início e fim de cada atividade e etapa do processo.

O presente trabalho se restringe a modelar matematicamente, para definição otimizada do tamanho de frota de locomotivas, a relação de trens prevista na grade de trens de carga geral. Os trens de ciclo e unitários, que operam num regime fechado de utilização de recursos, onde o trem carregado transfere recursos para o vazio e assim sucessivamente, ficam de fora do escopo de atuação deste trabalho.

A Figura 2 ilustra um exemplo hipotético de grade contendo dois trens, e as informações necessárias para programação, execução e controle das atividades previstas. Nela são definidas a nomenclatura de cada categoria de trens, suas

estações de origem e destino, com os respectivos horários de partida e chegada, uma lista detalhadas de todos os pátios onde o trem executará atividades (com o tempo de permanência planejado em cada um), uma diretriz para formação dos trens (identificamos a periodicidade de formação do respectivo trem, no que tange os dias da semana e feriados), além de um campo onde podem ser incluídas particularidades sobre as mercadorias transportadas, restrições de formação ou até mesmo exclusão com outros trens.

Grupo de Trens Carga Geral															
ID	Trem	Origem	Horário	Destino	Horário	Circulação	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab	Dom	Fer	Observação
1	TREM_1	Pátio_01	13:10	Pátio_18	05:00	15:50	X	X	X	X	X				Especificidades de Carga, Itinerário e Excludência
	Pátio	Atividade	Chegada	Partida											
	Pátio_03	Pesar Composição	13:30	14:00											
	Pátio_06	Trocar Tripulação	16:15	16:30											
	Pátio_10	Aguardar faixa de circulação	23:15	01:00											
2	TREM_2	Pátio_17	22:00	Pátio_22	13:00	15:00	X		X		X			X	Especificidades de Carga, Itinerário e Excludência
	Pátio	Atividade	Chegada	Partida											
	Pátio_18	Trocar Tripulação	22:20	22:50											
	Pátio_19	Anexar e Retirar Vagões	03:30	09:00											
	Pátio_21	Pesar Composição	10:00	10:30											

Figura 2: Grade de trens hipotética contendo dois trens. Fonte: O autor.

Na grade de trens, pode haver trens substitutos, que são composições que não podem ser formadas simultaneamente no mesmo dia, por compartilharem recursos físicos de tração e tripulação para movimentação dos vagões. O conceito é utilizado para contemplar pequenas variações de itinerário e horários das atividades previstas, em virtude de manutenções previstas de via permanente, na maioria dos casos.

1.5

Definição do problema

Tomando-se como base uma concessionária brasileira do setor ferroviário, o processo corrente de dimensionamento e planejamento de locomotivas (definido como um problema estratégico-tático), é composto por atividades predominantemente manuais e altamente dependentes da experiência operacional de seu responsável. Ele consiste essencialmente da definição do detalhamento da frota necessária e da programação das locomotivas necessárias para garantir a operacionalização de todos os trens previstos na grade de carga geral.

O processo atual não conta com ferramentas de otimização capazes de garantir a produtividade da frota nem evitar problemas associados a superestimativa ou subestimativa da frota. Uma apresentação mais profunda do problema está disponível no Capítulo 4.

1.6

Objetivos do trabalho

1.6.1

Objetivo principal

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para determinar o dimensionamento de frota de locomotivas dada uma grade de trens de carga geral para um horizonte temporal de 24 horas.

1.6.2 Objetivos específicos

Realização de uma revisão bibliográfica breve dos métodos utilizados para tratamento do problema de alocação de locomotivas (LAP – *locomotive assignment problem* ou LSP – *locomotive schedule problem*).

Definição de uma modelagem matemática para o problema estratégico/tático do planejamento da utilização de locomotivas para cumprimento de uma grade horária de trens de carga geral conhecida.

Codificação do modelo de otimização utilizando Python.

Aplicar o método para um cenário conhecido, avaliando o cumprimento do tempo estipulado de processamento.

Encontrar uma solução que represente economia de recursos, quantificando a economia, se existir.

1.7 Metodologia de pesquisa

Segundo Lakatos e Marconi (2018) o estudo segue uma abordagem dedutiva, partido de teorias e leis para aplicação nos fenômenos particulares e segue uma classificação, segundo Moraes (2015), de estudo aplicado, quanto à natureza da pesquisa; de abordagem quantitativa, quanto à abordagem do problema, e exploratório (aplicado), quanto aos seus objetivos.

1.8 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos, sendo este primeiro responsável pela introdução e delimitação da importância do estudo.

O capítulo 2 traz a revisão bibliográfica dos conceitos utilizados.

O capítulo 3 descreve o método proposto.

O capítulo 4 define conceitos associados ao estudo aplicado (apresentação do problema, características da concessionária e abordagem do desenvolvimento), além de trazer resultados obtidos e verificação dos objetivos.

O capítulo 5 traz as conclusões obtidas e uma relação de sugestões para trabalhos futuros.

2 Referencial teórico

2.1 Problemas de Alocação de Locomotivas

Por mais de 60 anos desde a publicação do trabalho de Bartlett (1957), parte significativa das abordagens propostas para o tratamento dos problemas de alocação de locomotivas (LAP – *locomotive assignment problem* e LSP – *locomotive scheduling problem*) têm como grande semelhança uma entre duas visões de frota (homogênea – quando apenas um modelo de veículos motrizes é considerado, ou heterogênea, quando esta quantidade de modelos é maior) e, com raras exceções, um em três horizontes temporais de abrangência das variáveis de decisão e restrições (estratégico, tático ou operacional – do mais longo para o mais curto), abrangendo desde o tamanho da frota a ser adquirida quanto a definição de uma otimização da política de manutenção de locomotivas entre viagens.

Bartlett (1957) apresenta uma metodologia para alocação das unidades motrizes de forma a minimizar o tamanho da frota necessária para atender a uma lista conhecida de partidas de trens. O método otimiza as conexões entre chegadas e partidas através da rede, definindo o fluxo das locomotivas para solução de um problema estratégico.

Charnes e Miller (1957) utilizaram programação linear para alocar cada par locomotiva-maquinista a um trem, presentes na programação de dado cenário conhecido.

Bartlett e Charnes (1957) desenvolveram um algoritmo capaz de encontrar a alocação de locomotivas que respeitasse restrições de manutenção de maneira otimizada.

Surmont (1965) e McGaughey et al. (1973) utilizam o método *out-of-kilter* para realizar respectivamente: minimização dos custos associados ao tamanho da frota e movimentação de locomotivas rebocadas para uma dada programação de trens; a distribuição de locomotivas e vagões *caboose*. Como curiosidade, a frota de vagões *caboose* é formada por veículos especiais adaptados para guarnecimento de equipamentos de segurança e habitualmente utilizados como corta-fogo entre o veículo trator e o restante de vagões de produtos perigosos.

Gohring (1971) descreveu modelo de fluxo de rede periódico resolvido através do algoritmo *out-of-kilter* (Ford e Fulkerson, 1962) para minimizar a frota da Southern Railway.

Florian et al. (1976) apresentam algoritmo capaz de encontrar, dada uma frota heterogênea de locomotivas, a combinação otimizada de tipos de locomotivas levando em consideração as necessidades de tração dos trens programados. Consideraram também questões associadas à depreciação e aos custos de manutenção das locomotivas. O modelo foi desenvolvido como um problema de fluxo de multiprodutos sobre uma rede espaço-tempo com variáveis e restrições adicionais para garantir a capacidade de tração através dos arcos da rede. Foi capaz de resolver satisfatoriamente o problema aplicado a uma região da Canadian National Railways envolvendo uma rede formada por 718 nós e 986 arcos (representando 216 movimentos de trens), com apenas 9 iterações do problema principal. Entretanto não apresentou o mesmo desempenho para dimensões maiores.

Gertsbach e Gurevich (1977) propõem um procedimento formal para construção de uma programação ótima e periódica para a frota de maneira semelhante ao trabalho de Bartlett e Charnes (1957).

Assad (1980) recomenda a incorporação explícita da dimensão temporal nos modelos de tratamento da distribuição de veículos através da transformação da rede física ferroviária em uma rede espaço-tempo. Além disso, recomenda a utilização de heurísticas como alternativa para evitar o elevado tempo de processamento dos problemas ferroviários dadas suas dimensões.

Booler (1980) propôs um algoritmo heurístico para resolução do problema de alocação de locomotivas (limitando a alocação de uma por trem), que partindo de uma solução inicial viável, atualiza a solução iterativamente através das informações reunidas do problema dual. Introduziu mais tarde, em Booler (1995), uma abordagem de relaxamento lagrangiano, que dualiza as restrições de ligação na função objetivo. O método consiste na substituição do problema original restrito por outro mais simples e com menos restrições, onde a solução do problema relaxado serve como aproximação para o problema original.

Desrosiers et al. (1981) desenvolveram um método, utilizando programação dinâmica, para determinar o caminho mínimo entre dois nós de uma rede, onde a cada nó está associada uma janela temporal na qual é permitida a visita ao mesmo. O método serve para definir rotas para uma determinada frota, respeitando-se as restrições de horário em cada localização.

Desrosiers et al. (1982) criaram um modelo capaz de definir, além da quantidade de veículos, os horários e rotas necessários para efetuar os percursos dentro de um intervalo de tempo imposto. Na resolução, tratam o tempo como variável contínua e definem simultaneamente os horários e rotas dos veículos, minimizando custos e a frota necessária para o volume de transporte esperado. Propõem um método de resolução baseado no método de decomposição de Dantzig-Wolfe, devido às dimensões do problema. O método foi sugerido para elaboração da tabela-horária dos trens e alocação de locomotiva, considerando restrições de manutenção.

Desrosiers, Soumis e Desrochers (1982) desenvolveram diversos modelos para determinação de rotas em redes espaço-tempo, respeitadas as restrições de horário (problema de frota mínima e fluxo máximo – usando o algoritmo proposto por Ford e Fulkerson; problema de frota mínima e de custo mínimo; problema de transporte ou alocação tratados como problemas de rede).

Nascimento (1988) desenvolveu uma heurística para alocação de locomotivas para utilização em conjunto com um sistema de informação em tempo real das localizações da frota. Valendo-se da posição atual das locomotivas e da relação de trens a serem tracionados, o algoritmo determina a alocação minimizando o tempo de viagem até o ponto de partida do trem, respeitando os horários previstos.

Smith e Sheffi (1988) utilizam uma modelagem que retrata a necessidade de tração de cada trem, expressa em *hp*, através do fluxo de redes de multiproducto com restrições vinculantes. O relaxamento de restrições da função objetivo é realizado através da inserção de um fator de penalidade que permite desviar dos parâmetros requeridos a um custo. O modelo foi resolvido com um método heurístico de duas fases: na primeira é obtida uma solução inicial através da alocação incremental de fluxo pelo caminho mais curto na rede, enquanto na segunda são realizadas trocas para avaliação de ciclos com custo marginal negativo, para melhoria da solução.

Booler (1989) definiu um método heurístico aplicado a um modelo de programação linear para minimizar os custos de programação de locomotivas dado um conjunto conhecido de trens. O método não exige que os horários dos trens sejam fixos e faz uso de uma heurística para evitar as dificuldades da programação inteira.

Wright (1989) utilizou métodos estocásticos, através de dois algoritmos distintos, para definir a alocação de locomotivas para uma tabela-horária conhecida de trens. O primeiro consiste no melhoramento local realizado sucessivamente a partir de pontos iniciais definidos aleatoriamente, enquanto o segundo foi baseado em métodos de “*simulating annealing*”. O autor recomenda que estudos adicionais sejam conduzidos, já que não julgava os algoritmos apropriados para utilização imediata.

Chih et al. (1990) descreve a implementação de um modelo de planejamento operacional para alocação de locomotivas objetivando a maximização da diferença entre receita e custo operacional. O modelo é baseado numa rede espaço-tempo e representa todas as movimentações de locomotivas possíveis durante o horizonte de planejamento. Para obter uma primeira aproximação da alocação de locomotivas, para os trens planejados em um horizonte semanal, um problema de fluxo de rede de multiproduto é resolvido através de uma decomposição.

Forbes et al. (1991) propõem um algoritmo exato similar, que resolve o problema relaxado de programação linear inteira antes de aplicar uma rotina de *branch-and-bound* para obtenção de uma solução inteira. Para resolver a versão relaxada contínua, são retiradas do problema as restrições de modelo de locomotiva. A solução deste relaxamento do problema é convertida para a versão dual do problema original onde é utilizada para encontrar a solução ótima através do Simplex dual.

Leal (1992) expandiu o estudo de Phottoff (1970), que trata de uma estação e propôs a programação de locomotivas para mais de duas estações. Partindo do método *branch-and-bound*, propõe a aplicação de uma técnica heurística para encontrar uma solução viável.

Nascimento (1993) modela um problema operacional de alocação de locomotivas através do fluxo em uma rede espaço-tempo, arredondando os tempos de viagem entre nós por dia e otimizando as viagens previstas num horizonte de poucos dias. O algoritmo usa dados extraídos de um sistema de localização em tempo real para encontrar a alocação otimizada, através do algoritmo *out-of-kilter*. A modelagem criada para programação da frota de vagões vazios foi adaptada para realizar o direcionamento das locomotivas.

Aragon (1994) apresenta três abordagens para o problema de alocação de locomotivas. A primeira utiliza a técnica heurística de *branch-and-bound* para resolver um problema de designação, sem restringir o modelo de locomotiva a ser utilizada por cada trem. A segunda consiste na utilização de SBC (sistema à base de conhecimento), para o problema de alocação de locomotivas em uma programação conhecida, minimizando o tempo total de viagem de locomotivas circulando sem vagões, chamadas no jargão ferroviário de “viagens escoteiras”. Utiliza o Prolog, que através de sua linguagem declarativa busca simplificar o processo de modelagem, uma vez que sua sintaxe se assemelha mais fortemente a uma descrição verbal do que à uma modelagem matemática convencional do problema. A terceira abordagem consiste na resolução determinística do problema de alocação de frota heterogênea através do método proposto por Wright (1989), aplicado como estudo de caso aos dados da SR-4 da RFFSA, utilizados no trabalho de Nascimento (1988).

Fischetti e Toth (1997) propõem um método heurístico para a resolução de problema de alocação de horizonte semanal onde locomotivas são distribuídas ao longo de depósitos associados a estações em uma rede. Cada depósito possui uma quantidade máxima de locomotivas disponíveis e todas precisam passar pelo depósito semanalmente para manutenção. As viagens precisam ser satisfeitas respeitando uma série de restrições operacionais. Utiliza uma versão relaxada do problema, sem as restrições operacionais e de manutenção, para encontrar os limites inferiores de fluxo da solução ótima no problema completo.

Nõu et al. (1997) utilizam uma abordagem similar para o problema tático de alocação na Swedish State Railways. Em sua modelagem, alocações cíclicas precisam satisfazer restrições de manutenção pautadas no acúmulo de distância percorrida. São utilizadas duas abordagens centradas nos métodos de *branch-and-bound* e decomposição de Dantzig-Wolfe. Na primeira, o problema de horizonte semanal é reduzido pela substituição por uma série de problemas de horizonte menor varrendo o mesmo período. Na segunda as restrições de manutenção são relaxadas para obtenção de um problema menor.

Ziarati, Soumis e Desrosiers (1997) propõem um modelo que trata a inviabilidade de uma solução por falta de locomotivas, inserindo variáveis de folga que irão atrasar a partida dos trens até que haja locomotivas suficientes para cobrir cada necessidade de tração. O trabalho foi complementado em Ziarati et al. (1999), ao modelar o problema estratégico de alocação de múltiplas locomotivas como um fluxo de multiproduto em redes, com alteração no método de *branch-and-bound* para ganho de performance através da redução de dimensionalidade dos subproblemas gerados no processo de decomposição do modelo. A essência do método consiste na alteração das decisões de *branching* ao definir projeções do problema em subespaços de baixa dimensão, para cada ramo. Nestas condições a solução de restrições se torna mais facilmente determinável e são definidos planos de corte para cada nó selecionado. A metodologia difere de outras técnicas de *branch-and-cut* por aplicar uma lógica inversa ao definir os cortes somente após o *branching*.

Para a resolução do problema tático de alocação de locomotivas, Cordeau et al. (2000) propõem a utilização de algoritmo baseado na decomposição de Bender. O método consiste em três fases e algumas verificações de resultado para definir se a solução é viável ou não, através de um modelo criado como fluxo de multiproduto em rede, para uma programação conhecida e cíclica de trens. Utiliza o conceito de blocagem de locomotivas para definir conjuntos (*consists*), que podem ser formados por modelos distintos, e alocá-los aos trens. O relaxamento de restrições do problema primal gera um conjunto de múltiplos subproblemas de fluxos de rede, através da retirada de variáveis e inclusão de novas restrições (várias delas inativas em situação de otimalidade).

Ford e Fulkerson (2004) não tratam explicitamente um problema de alocação de locomotivas, mas propõem uma metodologia aplicável a esta classe de problemas. Em sua formulação buscam encontrar o fluxo máximo de multiprodutos em rede, partindo da afirmação de que pelo método Simplex, na época do estudo, até mesmo problemas de pequenas dimensões tornam-se incalculáveis explicitamente devido a elevada quantidade de variáveis e restrições. Utilizam uma formulação de arco-rede, fazendo uso da resolução de subproblemas capazes de encontrar a menor rede para uma lista de nós, como definição das colunas de cada produto específico no problema original, para aplicação do método Simplex ao invés de enumerar exaustivamente as múltiplas redes associadas a cada produto.

Ahuja et al. (2005) propõem a modelagem do problema tático de alocação de locomotivas como um fluxo de multiproduto em rede espaço-tempo com horizonte de uma semana, levando em consideração uma frota heterogênea, possibilidade de circulação rebocada ou individual (sem vagões) para garantir o cumprimento da programação de trens, além da opção de quebra de blocos. Devido à grande dimensão gerada pelo realismo do modelo, mesmo nas menores instâncias do problema, propõem uma metodologia heurística para acelerar a convergência de uma solução. O modelo de programação inteira mista é simplificado para o horizonte diário e aplicado recursivamente para obtenção da solução para a programação semanal.

Vaidyanathan et al. (2008a) apresentam uma formulação complementar ao trabalho de Ahuja et al. (2005), ao inserir mais variáveis e restrições ao problema

de planejamento de locomotivas (como minimização da quebra de blocos, definição de uma programação cíclica conhecida, inclusão de requisitos de *cab-signal* e compartilhamento de frota), para torná-lo ainda mais realista. Foi utilizada uma formulação híbrida que permite a circulação de locomotivas rebocadas, que passam a ser consideradas individualmente ao invés de fazerem parte de um bloco. Simplifica o horizonte de programação para um dia na construção da solução de horizonte semanal, tendo tornado possível encontrar soluções para instâncias que não puderam ser resolvidas com a modelagem de 2005.

A modelagem foi novamente expandida em Vaidyanathan et al. (2008b), através da inserção de novas variáveis e restrições para controle da distância percorrida pela frota, para gestão dos abastecimentos, e para a programação de manutenções preventivas das locomotivas. O problema é decomposto em dois subproblemas para lidar com a elevada dimensão: primeiro é resolvido o problema de planejamento das locomotivas para na sequência ser resolvido o problema de roteamento, através do método chamado de *String Decomposition*.

Sabino et al. (2010) desenvolveram um método para alocação de locomotivas de manobra, baseado em *Ant Colony Optimization*, para resolução do problema operacional em um horizonte de tempo dado, que apesar de não tratar da alocação de trens de carga, apresenta um processo de otimização até então não aplicado a esta classe de problemas. O modelo considera uma função multiobjetivo contemplando tanto custos de transporte fixos quanto variáveis, otimizada através de um algoritmo que trata múltiplas colônias (a primeira relacionada a redução de custos variáveis associados a viagens de locomotivas sem vagões e a segunda focada na maximização da utilização das locomotivas através da minimização dos tempos de espera). Foram implementadas duas variantes com regras distintas de atualização dos feromônios e comparados os resultados.

Piu et al. (2015) propõem para a resolução do problema de alocação de locomotivas o conceito de seleção preliminar de blocos (*consists*), resolvendo um subproblema inicial para definição dos blocos de locomotivas a serem considerados no problema principal. Para tanto, dada uma programação de trens conhecida, dividem o processo de planejamento de alocação de locomotivas em três fases: planejamento, programação e roteamento. Foi um dos primeiros trabalhos a considerar, mesmo que parcialmente, a otimização integrada de variáveis e restrições de horizontes temporais distintos. O subproblema de seleção de blocos é responsável pela integração parcial entre as fases de planejamento e roteamento do problema principal, e consiste na avaliação dos custos de parada para abastecimento, do custo de abastecimento pela heterogeneidade da frota e da viabilidade de combinação da frota. O objetivo da inclusão preliminar é facilitar a obtenção de um roteamento e que seja mais econômico.

Premkumar e Ram Kumar (2020) propuseram a criação de um modelo integrado para resolução do problema de alocação de locomotivas com foco nos trens de passageiros da Indian Railways, levando em consideração as restrições dos três horizontes de atuação. Partindo de uma modelagem do fluxo de multiproduto em rede espaço-tempo, defendem a utilização de restrições adicionais integrando os diferentes horizontes num modelo único. Definiram uma heurística baseada no algoritmo de Dijkstra para tratar a dimensionalidade do problema realista de alocação de locomotivas. Apesar de não tratar diretamente da programação de locomotivas em trens de carga, apresenta grande relevância pela inovação promovida pela modelagem integrada de múltiplos horizontes.

De acordo com Piu et al. (2015) e Premkumar e Ram Kumar (2020) existe escassez de trabalhos onde decisões e restrições de horizontes distintos sejam tratadas simultaneamente, objetivando melhores resultados globais do que aqueles obtidos através de modelos construídos para um único horizonte.

Na Tabela 1 encontra-se um resumo comparativo dos trabalhos, delimitando o tipo de frota utilizado na abordagem de cada um (entre homogênea ou

heterogênea), definindo o horizonte de planejamento (entre estratégico, tático ou operacional), determinando se abordagem implica numa solução exata ou se foi aplicada algum tipo de heurística e finalmente qual foi o tipo de modelagem matemática utilizada.

Trabalho	Tipo Frota	Horizonte Planejamento	Abordagem	Tipo Modelagem
Bartlett (1957)	Homogênea	Tático	Exata	Programação linear
Bartlett e Charnes (1957)	Homogênea	Operacional	Exata	Programação linear
Charnes e Miller (1957)	Homogênea	Operacional	Exata	Programação linear
Surmont (1965)	Homogênea	Operacional	Heurística	Programação linear
Florian et al. (1976)	Heterogênea	Tático	Exata	Programação inteira-mista
Gertsbach e Gurevich (1977)	Homogênea	Operacional	Exata	Programação linear
Smith e Sheffi (1988)	Heterogênea	Estratégico	Heurística	Decomposição de Bender
Booler (1989)	Heterogênea	Operacional	Exata	Programação linear
Wright (1989)	Homogênea	Operacional	Exata	Programação Inteira
Chih et al. (1990)	Heterogênea	Operacional	Heurística	Decomposição heurística
Forbes et al. (1991)	Homogênea	Tático	Heurística	<i>Branch-and-bound</i>
Nascimento (1993)	Heterogênea	Operacional	Heurística	Método <i>Out-of-Kilter</i>
Aragon (1994)	Heterogênea	Operacional	Exata e Heurística	Programação inteira, SBC e <i>Branch-and-bound</i>
Booler (1995)	Homogênea	Operacional	Heurística	Relaxamento lagrangeano
Fischetti e Toth (1997)	Homogênea	Tático	Heurística	Relaxamento lagrangeano

Trabalho	Tipo Frota	Horizonte Planejamento	Abordagem	Tipo Modelagem
Nõu et al. (1997)	Heterogênea	Tático	Heurística	Decomposição de Dantzig-Wolfe
Ziarati, Soumis e Desrosiers (1997)	Heterogênea	Operacional	Heurística	Decomposição de Dantzig-Wolfe
Ziarati et al., (1999)	Heterogênea	Operacional	Heurística	<i>Branch-first, cut-second</i>
Cordeau et al., (2000)	Heterogênea	Estratégico	Exata	Decomposição de Bender
Ford e Fulkerson (2004)	Heterogênea	Estratégico	Heurística	Formulação Arc-Chain
Ahuja et al. (2005)	Heterogênea	Tático	Heurística	Programação inteira-mista
Vaidyanathan et al. (2008a)	Heterogênea	Operacional	Heurística	Programação inteira-mista
Vaidyanathan et al. (2008b)	Heterogênea	Operacional	Heurística	<i>String decomposition</i> e programação dinâmica
Sabino et al. (2010)	Heterogênea	Operacional	Heurística	Otimização com colônia de formigas
Piu et al. (2015)	Heterogênea	Tático e Estratégico	Exata	Programação inteira-mista, <i>Consist Selection</i>
Premkumar e Ram Kumar (2020)	Heterogênea	Estratégico, Tático e Operacional	Heurística	Programação inteira-mista, heurística baseada no algoritmo de Dijkstra

Tabela 1: Comparativo de alguns dos trabalhos citados. Fonte: O autor.

Em linhas gerais, a representação de uma frota heterogênea predomina com aproximadamente 2/3 dos trabalhos avaliados, sendo predominante também a utilização de heurísticas (com aproximadamente 2/3 dos trabalhos avaliados) sobre a obtenção de soluções exatas. No que tange ao horizonte de planejamento, a maior parte dos trabalhos avaliados se concentra em variáveis e restrições de apenas um horizonte temporal (92,3% dos trabalhos, sendo mais frequente o tratamento de problemas operacionais, com quase 58% das publicações avaliadas). Apenas 2 trabalhos (7,7% do total) tratam simultaneamente de questões de múltiplos horizontes temporais.

A modelagem através da resolução de um problema de *multicommodity network flow* (ou fluxo de multiproduto em rede) em uma rede espaço-tempo com restrições adicionais, fazendo uso de técnicas heurísticas, meta-heurísticas ou de decomposição do modelo, é a mais difundida. Carece, no entanto, de um aprofundamento no tratamento simultâneo de objetivos e restrições de horizontes temporais diferentes para obtenção de resultados melhores.

O presente trabalho busca a modelagem de um problema estratégico-tático, o que, como será demonstrado, foi alcançado com uma solução exata em tempo de processamento aquém das expectativas iniciais. Essa constatação permite sugerir, para trabalhos futuros, ampliar o escopo com inclusão de restrições de cunho operacional.

3 Metodologia

3.1 Metodologia Geral

Após a realização da revisão bibliográfica, foi identificada a metodologia de representação do modelo operacional estudado mais indicado como sendo a criação de uma rede espaço-tempo com a utilização de restrições adicionais para encontrar o fluxo de custo mínimo de multiprodutos (*multicommodity network flow*).

Parte dos trabalhos estudados lidava com a grande dimensionalidade envolvida na resolução de versões realistas do problema de alocação de locomotivas através da redução do horizonte de avaliação e da aplicação de heurísticas para encontrar uma solução satisfatória dentro de um intervalo de tempo aceitável.

A estratégia definida na metodologia do trabalho consiste em aproveitar a característica cíclica de uma grade de trens conhecida para encontrar uma solução exata em um tempo de processamento inferior a 24 horas. Esse alvo é justificado pela natureza do trabalho realizado pela área de planejamento da concessionária brasileira, que precisa ajustar mensalmente o tamanho de frota necessário para cumprimento da grade de trens de carga geral, sempre que ela sofre alterações.

3.2 Representação da malha

A primeira etapa do método consiste na adaptação da malha ferroviária abrangida pela grade de trens em estudo, à fim de permitir a criação da rede espaço-tempo. Com o intuito de preservar minimamente a identidade da concessionária brasileira, foi tomado como exemplo um trecho de uma ferrovia americana, identificam-se os ramais e pátios de interesse numa hipotética grade de trens, limitando a seleção de locais a aqueles com relevância para a movimentação de locomotivas. Apesar de inspirada no mapa real de uma ferrovia americana, a representação do trecho de malha selecionado não visa representar, de nenhuma forma, o modelo operacional praticado por aquela ferrovia.

A partir daí os pátios devem ser agrupados segundo suas posições ao longo do ramal, de forma a facilitar a leitura e representação da circulação dos veículos ao longo da rede espaço-tempo. No exemplo ilustrado na Figura 3, foram selecionadas 22 localizações hipoteticamente relevantes para o fluxo de locomotivas e representadas as movimentações de 2 trens do exemplo de grade fornecido no capítulo anterior.

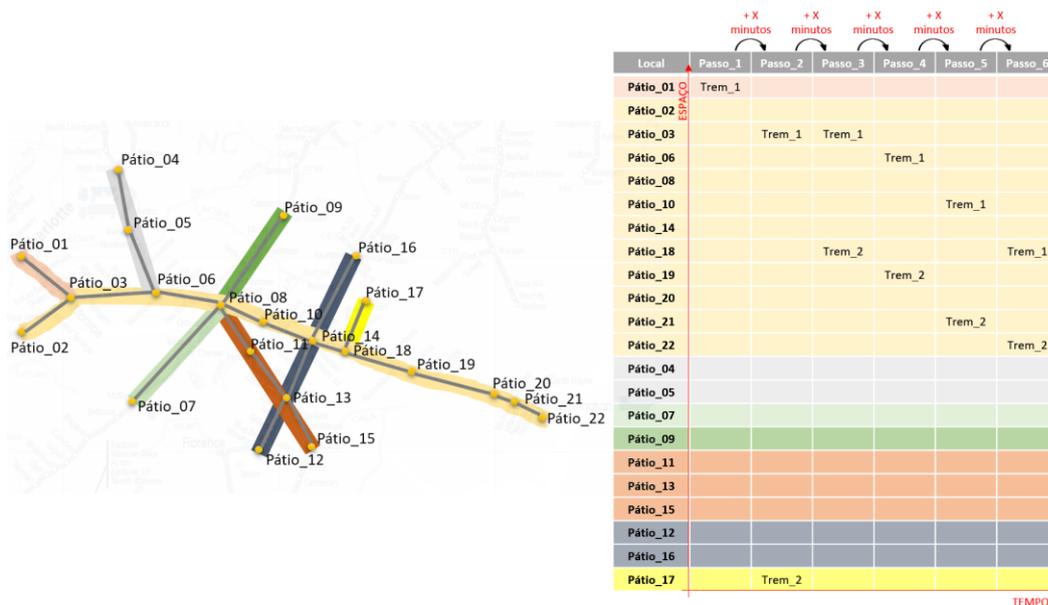


Figura 3: Adaptação de trecho de ferrovia americana. Fonte: O autor.

A definição do passo (intervalo temporal adotado no processo de conversão do tempo em uma grandeza discreta) utilizado na criação da rede espaço-tempo possui relação direta com a dimensionalidade do problema e consequentemente com o tempo de processamento gasto para encontrar uma solução.

Depois da definição dos locais de interesse e da quantidade de instantes a serem avaliados, o método consiste na criação dos nós a partir da contração de cada localização em todos os instantes do horizonte temporal. Adicionalmente são criados nós artificiais para representar a fonte e o depósito de locomotivas, respectivamente os pontos a partir dos quais todas as locomotivas iniciam o fluxo através da rede e o ponto para o qual todas precisam fluir ao término da otimização.

No exemplo hipotético apresentado na Figura 3, a quantidade de nós existentes é de 134 (22 localizações físicas representadas em 6 instantes de interesse acrescidos os nós artificiais).

A etapa seguinte, do processo de criação da rede, passa pela definição dos arcos viáveis de conexão entre os nós.

3.2.1

Caráter cíclico da grade de trens de carga geral

Tomando como base uma grade de trens conhecida, é importante ressaltar uma característica que permite a fixação do horizonte temporal de otimização em 24 horas, apesar de o planejamento contido nela prever sua aplicação em períodos mensais: é prevista a circulação de todos os trens principais da grade diariamente. Isso significa que entre a circulação dos trens principais e de seus substitutos, é esperada a formação de um trem com composição média definida para conjunto de excludência.

Dessa característica desdobram-se duas propriedades: a primeira define que ao dimensionar recursos para os trens principais automaticamente garante-se recursos para a circulação dos trens substitutos (uma vez que suas formações são mutuamente excludentes) e a segunda define que são esperadas circulações simultâneas na malha de composições de um mesmo trem, para aqueles cujo tempo de viagem for superior a 24 horas.

Por exemplo, tomando o trem com maior tempo de viagem disponível na grade (com um tempo previsto de aproximadamente 60 horas entre a partida de sua estação de origem e a chegada na estação de destino), é possível representar graficamente, através das linhas as 22 localizações de interesse e, através das colunas, a posição do trem em cada intervalo de tempo (passo).

As linhas horizontais representam a duração das paradas do trem em uma mesma localização, enquanto as linhas inclinadas representam a viagem física entre localizações. A representação gráfica das operações do trem pode ser conferida na Figura 4.

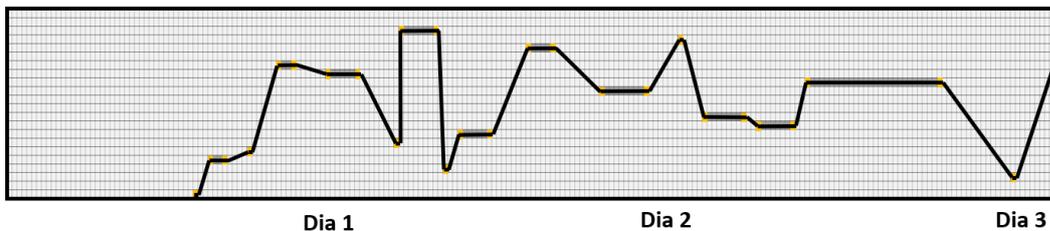


Figura 4: Representação da grade do trem de maior tempo de viagem. Fonte: O autor.

Como o tempo de viagem do trem excede o horizonte fixo de 24 horas proposto, associado ao fato de que os trens circulam diariamente (todos os dias é esperada a circulação de uma composição seguindo a programação retratada na Figura 4), é esperado que haja até 3 composições desse trem circulando simultaneamente todos os dias. Essa característica pode ser visualizada na Figura 5.

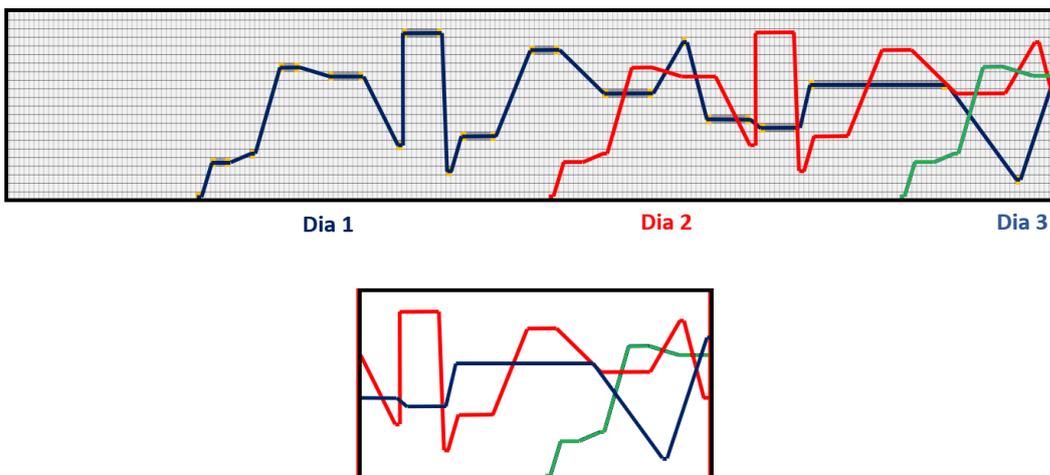


Figura 5: Definição da demanda de regime do trem exemplo. Fonte: O autor.

Avaliando o horizonte de 72 horas apresentado na Figura 5, tem-se a representação de uma primeira circulação do referido trem plotado em azul escuro. Simultaneamente às atividades realizadas pelo primeiro trem ao longo do dia 2, tem-se a partida de uma segunda composição, plotada em vermelho. E finalmente, atingindo a condição de regime ao longo do terceiro dia, simultaneamente às atividades dos dois trens anteriores, tem-se a partida de uma terceira composição desse trem, plotada em verde. A demanda de regime de cada um dos trens principais da grade precisa ser definida para que a otimização encontre a frota mínima necessária para cumprimento da circulação diária de todos os trens da grade.

3.3

Definição dos movimentos viáveis na matriz espaço-tempo

A etapa seguinte do processo consiste na elaboração de uma matriz binária que define a viabilidade de movimentação entre os nós, configurando a existência de arcos entre os nós.

Partindo de uma matriz hipotética quadrada, com dimensões de 134 x 134 (e que representariam a possibilidade de conexão de todos os nós entre si), são avaliadas as movimentações que respeitem simultaneamente os tempos de viagem praticados entre as localizações, as conexões físicas entre elas bem como o fluxo temporal adequado. Para isso, são utilizadas duas matrizes auxiliares, responsáveis pela definição das conexões físicas, a matriz de vizinhança e a matriz dos tempos de viagem.

A matriz de vizinhança, apresentada na Figura 6, nada mais é do que uma matriz binária contendo o relacionamento entre todos os pátios selecionados entre si, preenchida com 0 para as movimentações não permitidas e com 1 em caso contrário.

Local	Pátio_01	Pátio_02	Pátio_03	Pátio_06	Pátio_08	Pátio_10	Pátio_14	Pátio_18	Pátio_19	Pátio_20	Pátio_21	Pátio_22	Pátio_04	Pátio_05	Pátio_07	Pátio_09	Pátio_11	Pátio_13	Pátio_15	Pátio_16	Pátio_17
Pátio_01	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_02	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_03	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_06	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_08	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
Pátio_10	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_14	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Pátio_18	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Pátio_19	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_20	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_05	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_07	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Pátio_09	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Pátio_11	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Pátio_13	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
Pátio_15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
Pátio_16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
Pátio_17	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Figura 6: Exemplo de matriz de vizinhança. Fonte: O autor.

A matriz dos tempos de viagem, representada pela Figura 7, é obtida a partir dos dados de circulação entre os pátios vizinhos e do passo considerando na etapa de criação da rede espaço-tempo. Sua representação retrata a quantidade de passos necessários para realização da movimentação entre duas localizações vizinhas. Por exemplo, assumindo hipoteticamente que a movimentação entre as localizações Pátio_01 e Pátio_03 seja possível e que leve uma hora, e delimitando que o passo tem a duração de trinta minutos, a matriz de tempos de viagem traria o valor 2, ou seja, o trem chegaria ao Pátio_03 dois passos após sua partida do Pátio_01.

Local	Pátio_01	Pátio_02	Pátio_03	Pátio_06	Pátio_08	Pátio_10	Pátio_14	Pátio_18	Pátio_19	Pátio_20	Pátio_21	Pátio_22	Pátio_04	Pátio_05	Pátio_07	Pátio_09	Pátio_11	Pátio_13	Pátio_15	Pátio_12	Pátio_16	Pátio_17
Pátio_01	1	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_02	0	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_03	2	4	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_06	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_08	0	0	0	4	1	2	0	0	0	0	0	0	0	2	2	4	0	0	0	0	0	0
Pátio_10	0	0	0	0	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_14	0	0	0	0	0	1	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	2	0
Pátio_18	0	0	0	0	0	0	4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Pátio_19	0	0	0	0	0	0	0	2	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_20	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_05	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_07	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Pátio_09	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Pátio_11	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Pátio_13	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	4	0	0
Pátio_15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0
Pátio_12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0
Pátio_16	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Pátio_17	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Figura 7: Exemplo de matriz dos tempos de viagem. Fonte: O autor.

Uma relação importante pode ser obtida dessas duas matrizes, definindo dois tipos de movimentos possíveis, a partir de uma localização: ou a locomotiva permanece na localização onde já se encontra até o instante seguinte (e por isso a diagonal principal da segunda matriz será sempre preenchida com 1) ou se movimentada para um dos pátios vizinhos, respeitando a quantidade de passos necessários para concluir a movimentação.

Adicionalmente precisam ser definidas as movimentações permitidas através dos nós artificiais. A fonte, tratada aqui pelo termo de “Super Fonte”, possui ligações permitidas apenas com as 22 localizações físicas no instante do passo 1 e com o “Super Depósito”, para que seja possível lidar com a otimização em um cenário cuja disponibilidade de locomotivas seja superior à frota necessária. O “Super Depósito”, além da conexão supracitada, tem movimentações permitidas a partir de cada uma das 22 localizações físicas no instante do passo final (passo 6, para o exemplo da Figura 3).

A Figura 8 traz a representação da rede espaço-tempo criada a partir da Figura 3, considerando a influência das matrizes de vizinhança e de tempos de viagem, além da inclusão dos nós artificiais.

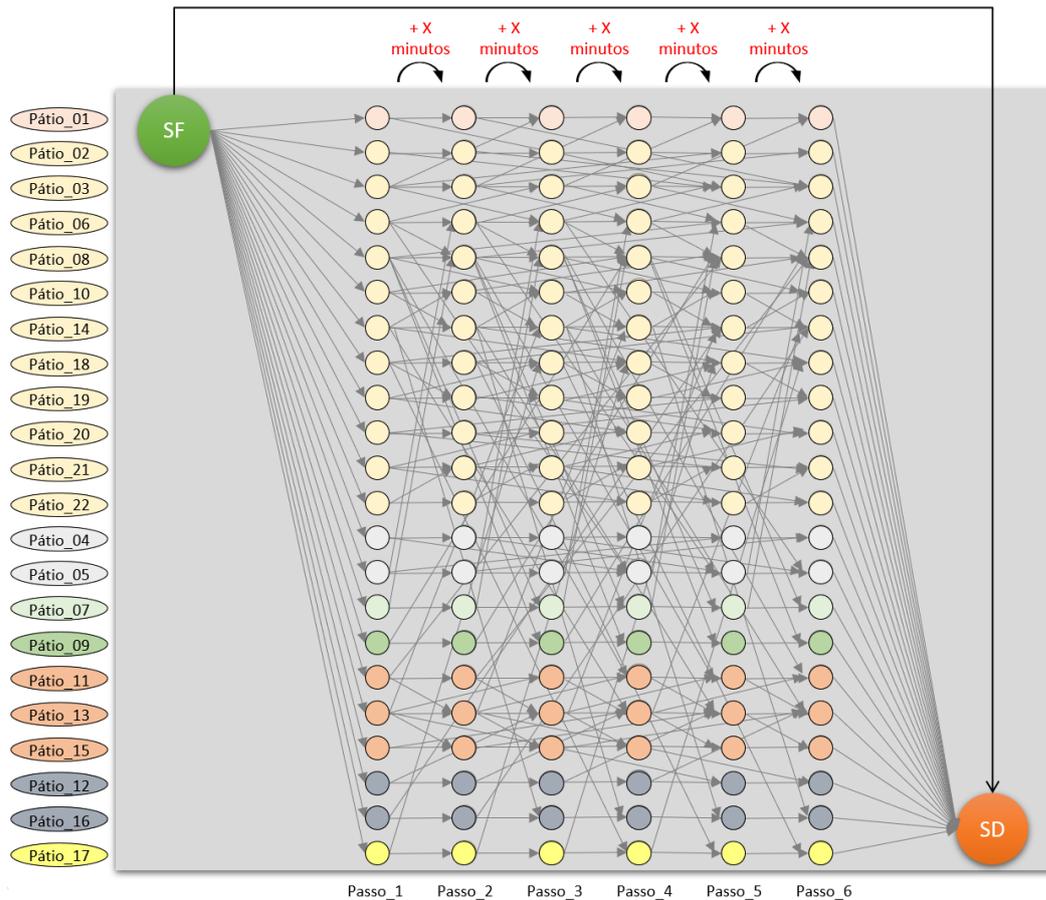


Figura 8: Rede espaço-tempo do exemplo de trecho da ferrovia americana. Fonte: O autor.

A Figura 9 traz um recorte da rede espaço tempo, para exemplificar a representação de uma localização física ao longo do tempo, bem como a dinâmica de movimentações possíveis de locomotivas através de seus arcos viáveis. Tomando o Pátio_01 como exemplo, tem-se a sua representação lógica ao longo de 6 instantes, igualmente espaçados no tempo pelo passo escolhido (círculos de borda vermelha na figura abaixo). As setas vermelhas representam os arcos viáveis para a movimentação de locomotivas através do Pátio_01.

A ligação entre a “Super Fonte” e o Pátio_01, em seu instante inicial delimitado no Passo_1, define a quantidade de locomotivas destacadas para iniciar sua movimentação física a partir daquela localização. A partir daí, cada veículo tem duas movimentações possíveis: permanecer fisicamente no Pátio_01 até o instante seguinte (viajando somente através do tempo) ou circular para um dos pátios vizinhos, respeitando o tempo de viagem necessário para concluir a movimentação (no exemplo dado, permanecer no Pátio_01 e avançar um passo ou viajar para o Pátio_03, avançando 4 passos). As setas vermelhas interligando o Pátio_03 ao Pátio_01 representam o fluxo direcionado entre estas duas localizações e participam do balanceamento para conservação de fluxo.

Por fim, a seta mais à direita da Figura 9 representa o fluxo de locomotivas do Pátio_01 para o sumidouro, identificando a quantidade de locomotivas que termina a programação fisicamente localizados no referido pátio. A dinâmica de fluxo é semelhante para cada uma das 22 localizações físicas representadas, respeitadas suas particularidades de interligação física e tempos de deslocamento para os pátios vizinhos.

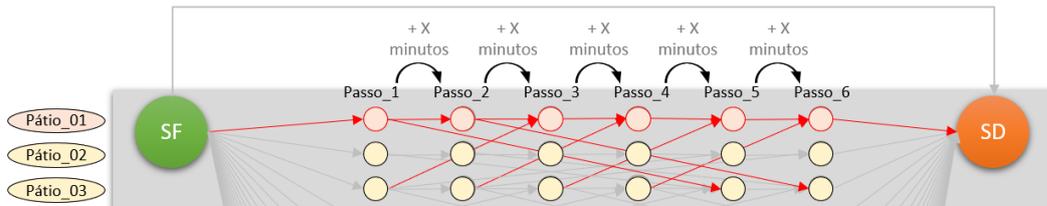


Figura 9: Recorte da rede espaço-tempo Fonte: O autor.

3.4

Definição da demanda mínima para atendimento da grade de trens

O processo de avaliação da demanda de transporte e construção da grade de trens passa por converter uma quantidade de carga informada pelos clientes da ferrovia, com toda sua variedade de tipos de mercadoria e particularidades de transporte, na necessidade de vagões por dia que precisam ser carregados e descarregados para o escoamento dos produtos.

Dessa forma, o ponto de partida dessa transformação passa por, conhecendo o modelo operacional de atendimento de cada cliente (seus pontos de origem e destino, tipos de mercadorias, tipos de vagões compatíveis, horários de funcionamento dos terminais, dentre inúmeros outros fatores), calcular a frequência média de vagões ofertados para os trens de carga geral nos diversos pátios da malha.

A partir das quantidades de vagões ofertados diariamente, calculadas para todos os clientes atendidos pela grade de trens, é possível delimitar os fluxos entre regiões e ponderar a quantidade de trens necessários e seus respectivos roteamentos (definir as estações a serem visitadas entre origem e destino, locais onde haverá manobras para retirada e recebimento de vagões).

Conhecendo então o volume de movimentações necessárias de cada ponto da malha para as demais regiões, bem como as restrições operacionais entre cada um desses pontos (por exemplo o comprimento máximo permitido para as composições e o perfil de circulação em cada um dos trechos) são criados tantos trens quanto forem necessários para garantir capacidade suficiente para escoar toda a demanda prevista.

O processo é mais complexo do que o acima descrito, já que paradas intermediárias são previstas na maioria dos trens e boa parte dos desenhos implica na utilização de mais de um trem para que os vagões atinjam seus destinos a partir das origens, e cujo objetivo é gerar capacidade suficiente com a utilização adequada de recursos (que representam custos operacionais significativos). Assim sendo, não é foco deste trabalho implementar melhorias no processo de construção da grade, mas esta categoria de problemas representa uma oportunidade completamente diferente de atuação.

Para a metodologia aqui proposta, aproveita-se o resultado da construção da grade de trens ao conhecer a demanda por tração de cada trem, entre os pátios com paradas previstas, conhecendo também os horários de início e fim de cada uma dessas paradas. Conhecendo tanto o comprimento quanto o peso das composições a serem tracionados entre cada pátio de interesse, é possível definir a quantidade de locomotivas necessárias para garantir esforço trator suficiente para o trabalho requisitado.

Para a referida concessionária, esta avaliação é realizada rotineiramente para avaliação de aquisição de locomotivas e direcionamento das estratégias de manutenção. É comum a avaliação da grade necessária para garantir capacidade de transporte para o volume pico mensal projetado para o horizonte sendo estudado.

Tendo estas considerações em vista, é conhecida a necessidade de esforço trator necessário para a movimentação de cada trem previsto na grade entre seus pátios de manobra (e assim sendo possível converter essa necessidade em quantidades de locomotivas para os diversos modelos a partir de suas curvas de capacidade motriz).

A partir dessa informação é possível definir os fluxos mínimos de movimentação necessários à operacionalização da grade de trens, definindo assim o que serão tratados como arcos de demanda mínima conhecida. Qualquer movimentação através dos arcos acima da quantidade mínima prevista como demanda da grade configurará fluxos que serão chamados de arcos de transição. Estes arcos são o caminho através dos quais será definido o sequenciamento de trens nas quais as locomotivas realizarão suas viagens, e que apresentam uma informação de interesse na definição do ciclo das locomotivas.

O sequenciamento de trens a ser seguido por cada locomotiva cria conjuntos de locomotivas que ficam dedicadas à formação de um conjunto específico de trens, realizados ciclicamente. O presente trabalho não apresenta uma metodologia dedicada à obtenção otimizada dos ciclos, mas gera informações suficientes para a sua obtenção manual.

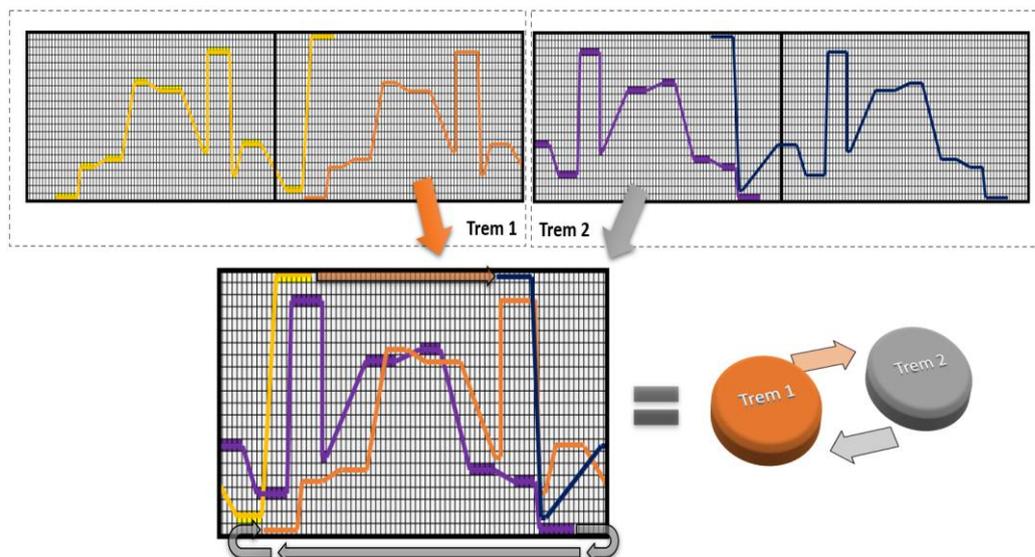


Figura 10: Exemplo mínimo de sequenciamento de trens Fonte: O autor.

A Figura 10 mostra um exemplo de conjunto mínimo de trens, formado pela realização cíclica de 2 trens distintos, em que o término de viagem de uma composição fornece as locomotivas para o trem do retorno (uma composição do Trem 1 cede locomotivas para a formação de uma composição do Trem 2, que ao encerrar sua viagem cede locomotivas para a formação de outra composição do Trem 1, reiniciando o ciclo).

3.5

Precificação dos custos de movimentação através dos arcos

Como metodologia de precificação do fluxo de locomotivas através dos arcos da rede espaço-tempo, propõe-se a utilização das seguintes categorias de custos, diretamente relacionadas à circulação dos trens:

3.5.1 Aquisição e depreciação de locomotivas

Abrange custos associados ao processo de aquisição de novas locomotivas para atendimento da grade de trens e custos proporcionais de depreciação para locomotivas já adquiridas. Estão relacionados aos arcos de movimentação das locomotivas entre a “Super Fonte” e cada uma das localizações físicas especificadas no Passo_1, conforme retratado na Figura 8.

Como exemplo toma-se a aquisição de uma locomotiva nova pela quantia de 15 milhões de reais e considera-se um prazo de amortização de 10 anos para o equipamento. O custo resultante para utilização de uma locomotiva desse modelo seria de 1,5 milhões de reais por ano, incidindo na ocasião da alocação de uma unidade em qualquer arco que ligue a “Super Fonte” a qualquer uma das 22 localizações no Passo_1.

Para o caso de locomotivas já adquiridas, o cálculo consideraria a parcela definida como amortização anual para o montante desembolsado na aquisição de cada uma delas. Para fins de escala, pode-se considerar a divisão deste custo por 365 dias, já que o horizonte de otimização considera uma janela fixa de 24 horas.

3.5.2 Consumo de combustíveis para tração (diesel)

Considerando que a frota de locomotivas disponível seja de tração diesel-elétrica (motores de tração elétricos abastecidos por geradores a diesel), modelo mais comum nas ferrovias brasileiras, o custo com combustíveis é desdobrado em duas vertentes:

A primeira delas, associada aos arcos com demanda fixa, considera a magnitude do trabalho a ser realizado (peso do trem a ser tracionado em toneladas brutas e a distância a ser percorrida no arco) e o consumo de combustível (consumo em litros considerado por MTKB – litros gastos para movimentar 1.000 toneladas brutas por 1 quilômetro) associado para cada modelo de locomotivas considerado.

Conhecendo o volume em TB projetado para cada trem em cada arco previsto na grade e o consumo de cada modelo considerado é possível estimar o montante gasto com combustível. Para os arcos sem demanda fixa na grade, aqueles que não consideram a movimentação de vagões, o consumo é calculado com parâmetros de movimentação da locomotiva como escoteira.

A segunda vertente considera o consumo de combustível associado ao estacionamento de uma locomotiva, sem realizar tração de carga. Seja durante a parada em determinada estação prevista no itinerário do trem, seja no estacionamento da locomotiva até a formação do próximo trem. Esta última vertente é calculada considerando a magnitude temporal do arco (tempo de estacionamento) ponderada pelo consumo de diesel previsto para aquele modelo de locomotiva quando operando em *idle* (com os geradores ativos sem acionar os motores de tração).

3.5.3 Manutenção de locomotivas

Abrange os custos associados ao processo de manutenção da frota, independente da natureza da manutenção (preventiva, corretiva ou afins). O montante gasto anualmente para manter aquele modelo de locomotivas (gasto médio,

uma vez que este valor pode variar para cada exemplar de locomotiva), é convertido num desembolso temporal e calculado através da duração do arco.

Por exemplo, considera-se que o custo médio de um determinado modelo de locomotivas seja de 200 mil reais por ano, e que ele possui um fator de disponibilidade de 85% (isto é, passa 85% do tempo disponível para realizar atividades de tração para a operação, e 15% do tempo quebrada ou sofrendo manutenções). Considerando um ano com 365 dias, tem-se um total de 8.760 horas, que significam 7.446 horas operacionais. Gera uma taxa de gasto de aproximadamente 28 reais e 86 centavos por hora operacional.

Os custos de manutenção devem ser calculados para cada modelo de locomotiva considerado, uma vez que o valor tende a ser bem diferente entre eles, e ponderado pelo tamanho do passo definido.

3.5.4

Tripulação dos trens

Abrange os custos associados ao emprego de maquinistas, auxiliares e manobreadores para realização das atividades associadas a cada um dos arcos. Conhecendo as restrições operacionais de cada trecho, é possível determinar a quantidade de pessoas necessárias para a realização das atividades previstas em cada um dos arcos (considerando trechos de monocondução, aqueles em que a tripulação é formada por apenas uma pessoa, além daqueles em que as atividades demandam a presença de auxiliares e manobreadores).

Considerando o custo médio desembolsado para manter um profissional de cada uma das categorias consideradas no quadro por ano, e sabendo a produtividade média da escala de cada um deles (quantidade de horas produtivas geradas pela escala planejada de cada profissional) é possível chegar numa taxa horária de gastos associada à tripulação.

Por exemplo, considerando o gasto médio anual de 180 mil reais para um profissional e que sua escala planejada tem um fator de produtividade de 70%, chega-se a uma taxa de aproximadamente 29 reais e 35 centavos por hora (180 mil reais / 6.132 horas operacionais). Os custos de tripulação devem ser calculados considerando a necessidade de pessoas para realização de cada arco e ponderado pelo tamanho do passo definido.

Conhecendo a relação de trens prevista na grade, e aproveitando o detalhamento de cada composição para os trechos pelas quais irá circular (quantidade de vagões de cada tipo, tanto carregados quanto vazios, com especificação dos comprimentos e volumes a serem tracionados), é possível determinar a quantidade mínima de locomotivas necessárias à realização do trabalho.

Para este conjunto de arcos, cuja demanda mínima precisa ser respeitada para gerar capacidade de tração suficiente, os custos de movimentação levam em consideração o volume planejado para cada trem, para que sejam considerados os custos relacionados ao consumo de diesel. Para os demais arcos, sem demanda especificada pela grade de trens, os custos de diesel são calculados considerando a composição como sendo formada somente por locomotivas. A precificação considerada para cada arco soma a resultante dos custos de cada natureza, detalhada para cada modelo de locomotiva separadamente.

3.6 Modelo matemático

O presente trabalho traz como proposta de modelagem a utilização de uma rede espaço-tempo para definição do fluxo multiproduto de custo mínimo (*multi-commodity network flow*), para o problema de alocação de locomotivas de uma grade conhecida de trens de carga geral.

Conjuntos e índices utilizados

$(i, j) \in A$ índices associados aos arcos;

$(m) \in M$ índice associado aos modelos de locomotivas;

V : Conjunto de todos os nós da rede;

V_F : Subconjunto de V , para os nós que contém fontes de locomotivas;

V_D : Subconjunto de V , para nós que contém depósitos de locomotivas;

V_I : Subconjunto de V , para os nós intermediários, que não contenham fontes nem depósitos de locomotivas;

Parâmetros utilizados

Demanda $Grade_{(i,j)}$: Demanda mínima prevista na grade para o Arco (i,j) ;

$c_{(i,j,m)}$: Custo associado ao fluxo de 1 locomotiva do modelo m através do Arco (i,j) ;

Disponibilidade (m) : Quantidade de locomotivas disponíveis para utilização, do modelo m ;

Variável de decisão

$x_{(i,j,m)}$: Quantidade de locomotivas do modelo m a serem movimentadas através do Arco (i,j) ;

Função objetivo

$$\text{Min } Z = \sum_{n=1}^i \sum_{n=1}^j \sum_{n=1}^m x_{(i,j,m)} * c_{(i,j,m)}; \quad (1)$$

Restrições

$$\sum_{n=1}^m \sum_{n=1}^j x_{(i,j,m)} \leq \text{Disponibilidade}_m, \forall i \in V_F; \quad (2)$$

$$\sum_{n=1}^m \sum_{n=1}^i x_{(i,j,m)} \geq \text{Disponibilidade}_m, \forall j \in V_D; \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^m x_{(i,j,m)} \geq \text{Demanda } Grade_{(i,j)}, \text{ para arcos com demanda fixa na grade}; \quad (4)$$

$$\sum_{n=1}^m \sum_{n=1}^i x_{(i,j,m)} = \sum_{n=1}^m \sum_{n=1}^k x_{(j,k,m)}, \forall j \in V_I; \quad (5)$$

$$x_{(i,j,m)} \in \mathbb{Z} * +, \text{ conjunto dos números inteiros positivos}; \quad (6)$$

A função objetivo (1) define o custo total associado ao fluxo de todas as locomotivas movimentadas através dos arcos para a solução encontrada. O objetivo é obter o tamanho da frota que seja suficiente para anteder a grade sob custo mínimo.

As restrições (2) e (3) estão associadas ao fluxo de locomotivas. A primeira define que toda a frota disponível precisa sair da “Super Fonte” enquanto a segunda força que o todo o fluxo de locomotivas termine no “Super Depósito”, ou sumidouro.

As restrições (4) definem quais são os arcos com demanda fixa prevista pela grade. Este parâmetro define qual é o fluxo mínimo de locomotivas a ser mantido nestes arcos, para garantir suprimento da grade. Cabe ressaltar que não existem arcos com demanda menor do que zero (fluxo negativo de locomotivas).

As restrições (5) apresentam o balanceamento de fluxo de locomotivas através de todos os nós, definindo que o somatório do fluxo de saída em cada um deles precisa, obrigatoriamente, ser equivalente ao somatório do fluxo de entrada.

As restrições (6) definem que as variáveis de decisão pertençam ao conjunto de números inteiros não negativos.

O modelo busca minimizar o custo total associado ao fluxo de locomotivas, ao longo da rede espaço-tempo, respeitando a demanda mínima prevista pela grade de trens, que seja suficiente para garantir esforço trator na circulação diária de composições dos trens principais.

4

Aplicação – Dimensionamento de uma grade conhecida

Neste capítulo serão apresentados os detalhes sobre a aplicação da metodologia proposta em uma concessionária brasileira, para verificar tanto a aderência ao tempo de processamento gasto na obtenção de uma solução exata, quanto para estimar o potencial de redução da frota necessária para atender a uma grade conhecida.

4.1

Detalhamento do problema

Para a referida concessionária, o problema de alocação de locomotivas para atendimento da grade de trens de carga geral, possui três abrangências distintas, no que diz respeito ao horizonte de planejamento:

No âmbito estratégico, a variável de interesse é a definição do tamanho de frota necessária para manter a circulação diária dos trens da grade, envolvendo a análise de cenários de longo prazo e tendo como resultado, entre outras definições, a política de aquisição e reposição de locomotivas. As avaliações desta versão normalmente estão associadas a decisões para anos futuros.

No âmbito tático, a variável de interesse está associada na definição do ciclo de programação de trens necessário para atendimento da grade (sequência a ser respeitada por cada locomotiva de maneira a garantir recursos de tração para cada um dos trens). O horizonte deste problema normalmente abrange a visão mensal do planejamento para o ano seguinte.

No âmbito operacional, e fora do escopo deste trabalho, tem-se como variável de decisão a programação individual de cada locomotiva, compensando fatores de curtíssimo prazo como avarias e ocorrências para manter recursos suficientes para cumprimento da grade. Tem como horizonte mais comum a programação de poucos dias.

O processo de planejamento estratégico-tático fica sob a responsabilidade da mesma equipe, e é realizado de maneira manual, sendo fortemente influenciado pela experiência operacional acumulada por seu responsável. A definição ótima do tamanho de frota necessária é, portanto, uma decisão crítica sobre a competitividade tarifária no mercado de cargas gerais, uma vez que os preços praticados no modal rodoviário delimitam o teto para o custo ferroviário correspondente, e sem contar com os incentivos estruturais existentes para manutenção, como acontece com as rodovias.

A definição exagerada da frota normalmente resulta no aumento de custo de operação e que por consequência acarreta numa tarifa pouco competitiva, que pode ocasionar a migração da carga para o modal rodoviário, enquanto uma definição insuficiente normalmente gera capacidade de tração deficitária e atraso na formação dos trens, além da perda de nível de serviço, que podem resultar em aumento nos prazos de atendimento e demanda reprimida.

O foco desta aplicação está direcionado à definição do tamanho ótimo da frota, dentro do prazo de processamento máximo de 24 horas, apesar de ser possível extrair o ciclo de programação de trens da otimização resultante.

4.2

A grade utilizada

Para confrontar o resultado da otimização, será utilizado o planejamento conhecido de uma grade passada, composta por 19 trens principais e com formação esperada diariamente. Como são esperadas circulações simultâneas para os trens cujo tempo de viagem excede 24 horas, a referida grade chega a gerar até 30 composições circulando num mesmo dia.

A distância prevista no itinerário destes trens implica num total de 8.152 quilômetros percorridos diariamente. O tempo médio de viagem dos trens desta grade é de aproximadamente 22 horas. São realizadas 126 paradas planejadas nos pátios diariamente, considerando as origens e destinos dos trens.

4.3

A frota utilizada

No processo manual de planejamento é prevista a utilização de 58 locomotivas disponíveis, composta de até 9 modelos diferentes e agrupados em 3 conjuntos distintos, considerando como fatores de similaridade: potência de tração, consumo de combustível e gastos anuais com manutenção.

O primeiro conjunto, formado por um único modelo de locomotivas, possui idade média de 10,0 anos, potência média de 4.380hp e consumo de combustível de 2,6 litros por milhares de TKB (tonelada*quilômetro brutos). Para este grupo foram considerados custos de manutenção da ordem de 120 mil reais por ano e disponibilidade de 92,5%. O valor anual de depreciação considerado foi de 835 mil reais para este grupo de locomotivas.

O segundo conjunto, também formado por modelo único, possui idade média de 14,5 anos, potência média de 4.400hp e consumo de combustível de 3,0 litros por milhares de TKB. Para este grupo foram considerados custos de manutenção da ordem de 160 mil reais por ano e disponibilidade de 86,0%. O valor anual de depreciação considerado foi de 750 mil reais para este grupo de locomotivas.

O terceiro conjunto, formado por 7 modelos diferentes, possui idade média de 38,5 anos, potência média de 3.600hp e consumo de combustível de 4,6 litros por milhares de TKB. Para este grupo foram considerados custos de manutenção da ordem de 210 mil reais por ano e disponibilidade de 78,0%. O valor anual de depreciação considerado foi de 700 mil reais para este grupo de locomotivas.

Como curiosidade, foi considerada a composição da frota disponível por 4% de locomotivas do grupo 1, 46% do grupo 2 e 50% do grupo 3.

4.4

Implementação do modelo

O modelo matemático foi implementado utilizando a linguagem de programação Python, através do ambiente Spyder, conforme mostrado na Figura 11, em um notebook Dell Inspiron equipado com processador Intel® Core™ i7 7700HQ e 16Gb de memória RAM. O código foi implementado através da biblioteca Pyomo e utilizada uma licença acadêmica do solver Gurobi para otimização.

The image shows the Spyder Python IDE interface. The main window displays a Python script for a Pyomo model. The code includes:

- Model creation: `model = pyo.ConcreteModel()`
- Variable declaration: `model.Xijm = pyo.Var(range(int(arcos)*int(afd_mods)), bounds=(0,None), domain=Integers)`
- Constraint lists: `model.demanda = pyo.ConstraintList()` and `model.frota = pyo.ConstraintList()`
- Objective function: `model.obj = pyo.Objective(expr = sum(Xijm[e]*float(Custojm[e]) for e in range(0,int(arcos)*int(afd_mods)))`

 The right-hand side of the IDE shows a console window with Python 3.8.5 output and a help dialog box titled "Uso" (Usage).

Figura 11: Tela do software Spyder mostrando parte do código fonte. Fonte: O autor.

O Anexo 2 apresenta uma descrição didática da sintaxe do Pyomo, incluindo um exemplo de aplicação para resolução de um problema de transporte.

Foi desenvolvido um segundo programa, com foco na representação gráfica da solução ótima obtida, para auxiliar no processo de construção dos ciclos das locomotivas. Este segundo programa não será objeto do presente trabalho, mas abaixo tem-se a representação da solução encontrada, construída com a utilização das bibliotecas Networkx e Matplotlib.

Na Figura 12 estão sendo retratadas as 22 localizações de interesse, ao longo dos múltiplos instantes abrangidos pela rede espaço-tempo, bem como os arcos de representação do fluxo de locomotivas. A espessura dos arcos é proporcional à quantidade de locomotivas envolvidas naquele fluxo. Foi suprimido o arco de ligação entre “Super Fonte” e “Super Depósito” (sumidouro), na Figura 12, por representar meramente o excesso de frota disponível para operação.

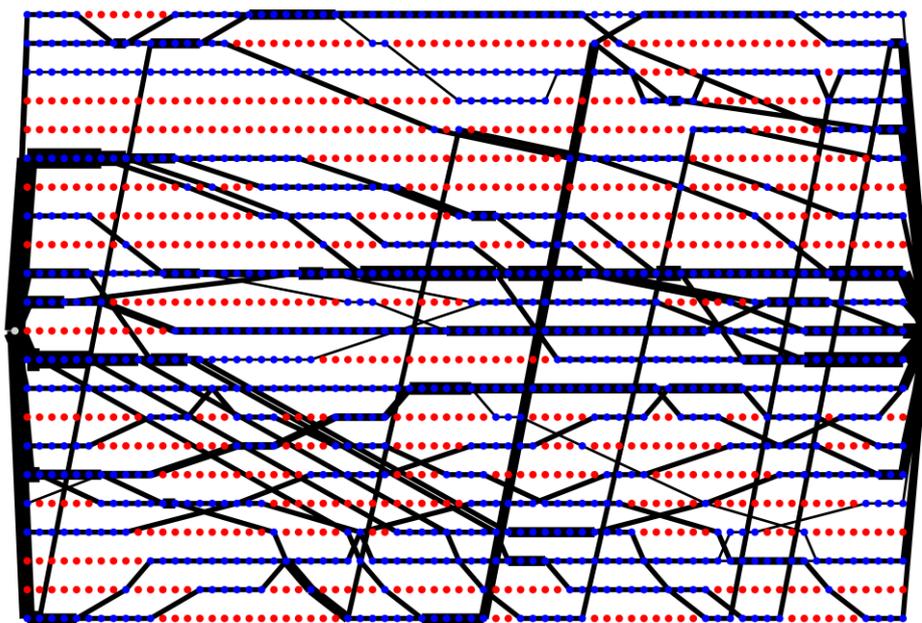


Figura 12: Representação gráfica do fluxo ótimo de locomotivas. Fonte: O autor.

No grafo representado na Figura 12 os nós da rede espaço-tempo são representados pelos círculos azuis (para os nós onde o fluxo de locomotivas é maior que zero) e pelos círculos vermelhos (para os nós onde o fluxo de locomotivas é nulo). Cada linha representa uma das 22 localizações de interesse ao longo do horizonte temporal (cada coluna representa um instante na linha do tempo, intervalados pelo passo). Tanto a fonte quanto o sumidouro são representados por círculos cinzas.

4.5

Tempo de processamento

Foram realizadas 5 execuções do programa de otimização, e estão registrados na Tabela 2, tanto o tempo de processamento quanto o tamanho ótimo de frota encontrando na corrida.

Número da Replicação	Tempo de Processamento (minutos)	Tamanho Otimizado Frota (locomotivas)
1	12,95	56
2	11,68	56
3	14,82	56
4	14,60	56
5	14,63	56
Média	13,74	56

Tabela 2: Tempos médios de processamento. Fonte: O autor.

É possível notar que a execução do programa de otimização acontece com folga em relação ao tempo limite especificado, de 24 horas. Este parâmetro é um bom indicador para recomendar a incorporação de novas restrições operacionais a trabalhos futuros, desdobrados do método aqui proposto, para que seja viável incorporar a vertente operacional do problema de distribuição de locomotivas.

4.6

Resultado da otimização

Como resultado da otimização, o tamanho da frota encontrado, e necessário para operacionalização de uma composição diária dos 19 trens estudados, foi de 56 locomotivas, representando uma economia de 2 veículos (redução de 3,45% da frota). E, apesar de parecer pouco significativa, uma redução de 2 veículos na necessidade de locomotivas, em cenários de expansão de volume, poderia resultar numa economia superior a 20 milhões de reais.

Em cenários de sobra de frota disponível, poderia aliviar os gastos com manutenção em aproximadamente 400 mil reais por ano, sem considerar a economia de combustível associada à não utilização de máquinas de pior rendimento energético.

Além da economia de recursos, e conseqüente aumento de competitividade tarifária, é importante ressaltar a melhoria de processo resultante do método de otimização, ao tornar impessoal e científico o critério de dimensionamento de locomotivas, impossibilitando a ocorrência de erros crassos de planejamento.

5 Conclusão

O desenvolvimento de uma metodologia científica para definição do tamanho de frota ideal sob a ótica de custos e produtividade operacional é essencial para melhorar tanto a competitividade do modal quanto o nível de serviço prestado.

Controlar bem a utilização da frota de locomotivas é fator de competitividade para uma ferrovia, tanto pelos impactos causados no nível de serviço prestado aos clientes (seja através de atrasos e supressões de trens devido à falta de locomotivas, quanto do subdimensionamento de composições devido disponibilidade de esforço trator insuficiente), quanto na rentabilidade das operações, dada a relevância dos custos de aquisição, manutenção e operação das locomotivas.

Por meio de fretes mais baixos, resultado da utilização de uma frota mais enxuta, o modal ferroviário aumenta o seu potencial de transporte na matriz de cargas brasileira, agregando mais previsibilidade, menores taxas de emissão de gases do efeito estufa, menores taxas de acidentes e de roubos de carga.

No presente trabalho, através da criação de uma rede espaço-tempo como representação do fluxo físico de locomotivas ao longo da malha, para atendimento de um conjunto conhecido de trens de carga geral com horários e itinerários pré-estabelecidos, buscou-se definir o tamanho mínimo da frota necessária ao cumprimento da circulação diária de uma composição de cada trem, bem como o direcionamento de uma frota heterogênea para os trens, capaz de minimizar os custos associados à amortização/aquisição de veículos, manutenção preventiva e corretiva, combustíveis e tripulação.

O objetivo principal do trabalho, de obter uma frota otimizada dentro de um período máximo de processamento de 24 horas foi alcançado, bem como cada um dos objetivos secundários estabelecidos.

Para avaliar o potencial de economia associado à aplicação da metodologia, foi parametrizada a programação prevista em uma grade conhecida e submetida ao programa de otimização. A aplicação demonstrou um potencial de economia de ao menos 2 locomotivas, em comparação ao dimensionamento de frota realizado manualmente, e espaço para incorporação de novas restrições operacionais em trabalhos futuros. Isso considerando que as instâncias mais demoradas levaram menos de 33 minutos para encontrar uma solução exata.

A metodologia tem potencial para reduzir a dimensão de versões realistas do problema de alocação e distribuição de locomotivas quando os trens obedecem a um regime cíclico de programação.

Como benefício da utilização do método proposto destaca-se, além da garantia de definir de forma ótima o dimensionamento mínimo da frota necessária para operacionalização da grade, o ganho de flexibilidade e confiabilidade para o processo de planejamento, o qual deixa de ser dependente da experiência do responsável permitindo a obtenção de uma programação eficiente e mais rápida, que pode ser usada na avaliação de cenários.

Tendo o tempo de processamento do modelo de otimização mantido uma folga significativa em relação ao alvo estabelecido, existe margem para aumentar a dimensão do problema de alocação de locomotivas, para tornar sua representação mais realista e potencialmente abranger o horizonte operacional.

Com este intuito, recomenda-se a incorporação de restrições operacionais de curtíssimo prazo, inerentes ao processo de programação e distribuição dos veículos aos trens. Seriam restrições de grande interesse como o controle da quilometragem percorrida por cada veículo entre abastecimentos (para mitigar qualquer risco de incidência de panes-secas), assim como controlar a quilometragem percorrida entre visitas às oficinas (para alterar a forma como é controlada a disponibilidade dos ativos e manter as taxas de quebra sob controle).

Para a concessionária objeto da aplicação do método, são consideradas somente locomotivas disponíveis no processo de planejamento de tração para os trens da grade, sendo necessários veículos adicionais para garantir o giro de oficinas e manter operacionais locomotivas suficientes para o suprimento da grade.

Para que o controle de quilometragem seja feito adequadamente pelo método aqui proposto, seria necessário substituir a quantidade de modelos como critério de multiproduto para a representação individual de cada locomotiva (para o exemplo retratado neste trabalho a quantidade de três modelos passaria a dar lugar a 56 locomotivas individualizadas).

Outra melhoria passível de desenvolvimento seria expandir o escopo do segundo programa desenvolvido, responsável por representar graficamente a solução ótima, para que ele seja capaz de traçar o relacionamento entre trens, de maneira a extrair o ciclo de programação a ser respeitado por cada conjunto de locomotivas.

Uma oportunidade que poderia aumentar o potencial de aplicação do método, seria desenvolver uma ferramenta complementar que seja capaz de acelerar o processo de parametrização dos trens da grade, para que a demanda associada à programação de cada trem possa ser obtida de maneira automatizada. Essa ferramenta tornaria mais célere o processo de criação e avaliação de cenários, criando os parâmetros necessários para a otimização de novos trens ou alterando as paradas previstas na grade estudada.

Referências bibliográficas

Ahuja, R. K., J. Liu, J. B. Orlin, D. Sharma, L. A. Shughart. (2005). **Solving real-life locomotive scheduling problems**. *Transportation Sci.* 39 pp. 503–517.

ANTF, **Informações Gerais – O setor ferroviário de carga brasileiro**. Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>. Acesso em: 15 de maio de 2020.

Aragon, F. R. C. (1994). **Alocação de locomotivas a trens**. Dissertação de Mestrado – PUC-Rio.

Assad, A.A. (1980). “**Models for Rail Transportation**,” *Transportation Research A*, Vol. 14A, NO. 3, pp. 205-220.

Bartlett, T.E. (1957), “**An Algorithm for the Minimum Number of Transport Units to Maintain a Fixed Schedule**”, *Naval Res. Logist. Quart.* 4, 139–149.

Bartlett, T.E., Charnes, A. (1957), “**Cyclic Scheduling and Combinatorial Topology: Assignment and Routing of Motive Power to Meet Scheduling and Maintenance Requirements. Part II. Generalization and Analysis**,” *Naval Res. Logist. Quart.* 4, 207–220.

Booler, J. M. P. (1980), “**The Solution of a Railway Locomotive Scheduling Problem**,” *J. Operational Res. Soc.* 31, 943–948.

Booler, J. M. P. (1995), “**A Note on the Use of Lagrangean Relaxation in Railway Scheduling**,” *J. Operational Res. Soc.* 46, 123–127.

Borba, J. L. (2006), “**Módulo: Material de Tração**”, Apostila de Pós-Graduação em Engenharia Ferroviária. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e Instituto de Educação Continuada, 11-14.

Charnes, A., Miller, M. H. (1957), “**A Model for the Optimal Programming of Railway Freight Train Movements**,” *Management Sci.* 3, 74-92.

Chih, K. C., Hornung, M. A., Rothenberg, M. S., Kornhauser, A. L., (1990), “**Implementation of a Real Time Locomotive Distribution System**,” *Mechanics Publications*, Southampton, U.K., 39–49.

Cordeau, J. F., P. Toth, D. Vigo. (1998). **A survey of optimization models for train routing and scheduling**. *Transportation Sci.* 32 pp. 380–404.

Cordeau, J.-F., F. Soumis, J. Desrosiers. (2000). **A Benders decomposition approach for the locomotive and car assignment problem**. *Transportation Sci.* 34(2) pp. 133–149.

Desrosiers, J., pelletier, P. e Soumis, F. (1981), “**Plus Court Chemin avec Contraintes d'horaires**”, *Centre de Recherche sur les Transports*, Université de Montréal, Publication 235.

Desrosiers, J., Soumis, F. e Desrochers, M. (1982), "**Routes sur un Réseau EspaceTemps**", Centre de Recherche sur les Transports, Université de Montréal, Publication 236.

Fischetti, M., Toth, P., (1997), "**A Package for Locomotive Scheduling**," Technical report DEIS-OR-97-16, University of Bologna, Italy.

Florian, M., Bushell, G., Ferland, J., Guerin, G., Nastansky, L., (1976), "**The Engine Scheduling Problem in a Railway Network**." INFOR 14, 121–138.

Forbes, M. A., Holt, J. N., Watts, A. M., (1991), "**Exact Solution of Locomotive Scheduling Problems**," J. Operational Res. Soc. 42, 825–831.

Ford, L.R., Fulkerson, D.R., (2004) **A Suggested Computation for Maximal Multi-Commodity Network Flows**. Management Science 50(12_supplement):1778-1780. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1040.0269>.

Gertsbach I. and Gurevich Y. (1977) "**Constructing an optimal fleet for a transportation schedule**." Transpn Sci. 11, 20-36.

Gohring, K. W., (1971), "**Application of Network Flow Theory to the Distribution of Locomotives and Cabooses**," Presented at the Institute of Management Sciences Southeastern Chapter Winter Symposium, March 3–4.

Hillier, F. S. e Lieberman, G. J. (2013). **Introdução à pesquisa operacional**. São Paulo: McGraw-Hill, pp. 341-370.

Leal, J.E. (1992), "**Programação de Locomotivas**," VI ANPET, V.2:1062 a 1074, Rio de Janeiro.

Mcgaughey, R. S., Gohring, K. W., Mcbrayer, R. N., (1973), "**Planning Locomotive and Caboose Distribution**," Rail Internat. 4, 1213–1218.

Lakatos, E. M., Marconi, M. A. (2018). **Metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, pp. 107-110.

Moraes, M. L. B. D. (2015). **Metodologia de Pesquisa Técnica e Científica**. UFMT pp. 18-26.

Nascimento, E P. (1988), "**Operação de Trens em Linhas de Alta Velocidade**", tese de mestrado, IME, Rio de Janeiro, Brasil.

Nascimento E. P. (1993) **Sistema de Apoio ao Planejamento e Gerenciamento da Operação do Transporte Ferroviário de Carga**. Tese de Doutorado – UFSC.

Nõu, A., Desrosiers, J., Soumis, F., (1997), "**Weekly Locomotive Scheduling at Swedish State Railways**," Technical report G-97-35, GERAD, E´ cole des Hautes E´tudes Commerciales de Montreal, 1997.

Piu, F., Kumar, V.P., Bierlaire, M., & Speranza, M.G. (2015). **Introducing a Preliminary Consists Selection in the Locomotive Assignment Problem**. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 82, pp. 217–237.

Premkumar, P., Ram Kumar, P.N. (2020). **Locomotive assignment problem: integrating the strategic, tactical and operational level aspects**. Ann Oper Res. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03627-3>

Pyomo, **The Transport Problem**. Disponível em: <https://nbviewer.org/github/Pyomo/PyomoGallery/blob/master/transport/transport.ipynb>. Acesso em: 27 de novembro de 2021

Sabino, J.A., Leal, J.E., Stützle, T., Birattari, M. (2010). **A multi-objective ant colony optimization method applied to switch engine scheduling in railroad yards**. Pesquisa Operacional 30, 486–514.

Smith, S., Sheffi, Y., (1988), “**Locomotive Scheduling under Uncertain Demand**,” Transp. Res. Rec. 1251, 45–53.

Surmont, J. (1965) “**Operational Research enables the rosters to be optimized**”. Bull. 1.R.C.A. 2, 329-343.

Vaidyanathan, B., Ahuja, R.K., Liu, J., Shughart, L.A., (2008a). **Real-life locomotive planning: new formulations and computational results**. Transportation Research Part B: Methodological 42, pp. 147–168.

Vaidyanathan, B., Ahuja, R.K., Orlin, J.B., (2008b). **The locomotive routing problem**. Transportation Science 42, pp. 492–507. ALTINEL, İ.K.; ÖNCAN, T. A new enhancement of the Clarke and Wright savings heuristic for the capacitated vehicle routing problem. Journal of the Operational Research Society, 2005;56(8);954-961.

Wright, M. B., (1989), “**Applying Stochastic Algorithms to a Locomotive Scheduling Problem**,” J. Operational Res. Soc. 40, 187–192.

Ziarati, K., Soumis, F., Desrosiers, J., Solomon, M.M., (1999). **A branch-First, cut-second approach for locomotive assignment**. Management Science 45, 1156–1168

Ziarati, K., Soumis, F., Desrosiers, J., (1997), “**Locomotive Assignment using Train Delays**,” Technical report G-97-27, GERAD, École des Hautes Études Commerciales de Montreal, Canada.

Anexos

Anexo 1 – Revisão da representação em redes

Segundo Hillier e Lieberman (2013), uma representação em rede fornece uma ferramenta conceitual e visual poderosa para descrever as relações entre os componentes de um sistema. Esse tipo de representação pode ser utilizado em praticamente todos os campos dos empreendimentos científicos, sociais e econômicos.

Muitos modelos de otimização de redes são tipos especiais de problemas de programação linear, e para o método apresentado a seguir, apresenta particular interesse a modelagem do problema de fluxo de custo mínimo (especialmente por sua estrutura muito genérica, fornecendo uma metodologia unificada para uma ampla gama de aplicações).

A formação de uma rede é dada por um conjunto de pontos e traços, denominados respectivamente de nós e arcos. Os nós representam localidades de interesse, enquanto os arcos representam as ligações entre os respectivos nós.

Os arcos podem ser classificados como direcionados, aqueles em que o fluxo de movimentação é permitido em apenas um sentido, ou não-direcionados, quando a movimentação é permitida em ambos os sentidos.

Nós	Arcos	Fluxo
Interseções	Vias	Veículos
Aeroportos	Rotas Aéreas	Aeronaves
Estações de bombeamento	Tubulação	Fluido
Pátios ferroviários	Linhas férreas	Trens/Locomotivas

Tabela 3: Papéis dos componentes de uma rede. Fonte: Adaptado de Hillier e Lieberman (2013).

A Tabela 3 lista a representação de cada tipo de componente de uma rede em aplicações de natureza específica (que entidades são representadas pelos nós, que tipo de conexão existe entre os mesmos e que tipo de entidade circula pela rede).

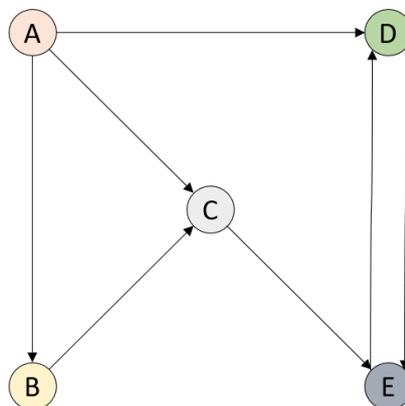


Figura 13: Representação de uma rede de arcos direcionados. Fonte: Adaptado de Hillier e Lieberman (2013).

A Figura 13 mostra a representação gráfica de uma rede formada por 5 nós e 7 arcos direcionados.

O problema do fluxo de custo mínimo considera a movimentação de “objetos” (que podem ser produtos, pessoas, serviços etc.) através de uma rede de arcos capacitados (capacidade limitada), atribuindo um custo para o fluxo sobre cada arco. Podem ser consideradas várias origens (nós de suprimento) e vários destinos (nós de demanda).

Para que a modelagem matemática seja realizada de maneira satisfatória, é necessário respeitar algumas características em sua definição, conforme adaptação do proposto por Hillier e Lieberman (2013):

- A rede precisa ser direcionada e conectada;
- Ao menos 1 nó precisa ser de suprimento;
- Ao menos 1 nó precisa ser de demanda;
- Todos os nós remanescentes são de transbordo;
- O fluxo através de cada arco só é permitido no sentido da seta, em uma quantidade máxima definida pela capacidade;
- A rede precisa ter arcos suficientes, com capacidade suficiente, para permitir que todo o fluxo gerado nos nós de suprimento atinja todos os nós de demanda;
- O custo do fluxo através de um arco é proporcional à quantidade deste fluxo, no qual conhece-se o custo unitário;
- O objetivo é minimizar o custo total de enviar a provisão disponível pela rede para satisfazer a demanda dada. Alternativamente o objetivo poderia ser maximizar o lucro total.

A seguir são definidos os conjuntos, índices, variáveis de decisão, bem como parâmetros de um modelo conforme proposto por Hillier e Lieberman (2013):

$(i, j) \in A$ índices associados aos arcos;

V representa o conjunto de todos os nós da rede;

$x_{i,j}$ representa o fluxo do nó i para o nó j ;

$c_{i,j}$ representa o custo unitário do fluxo de i para j ;

$u_{i,j}$ representa a capacidade de movimentação de i para j ;

b_i representa o fluxo líquido gerado em i ; $b_i > 0$ quando i é um nó de suprimento, $b_i = 0$ quando i é um nó de transbordo e $b_i < 0$ quando i é um nó de demanda;

Função objetivo

$$\text{Min } Z = \sum_{n=1}^i \sum_{n=1}^j x_{(i,j)} * c_{(i,j)} \quad (7)$$

Restrições

$$\sum_{n=1}^j x_{(i,j)} - \sum_{n=1}^k x_{(k,i)} = b_i, \forall i; \quad (8)$$

$$x_{(i,j)} \geq 0, \forall i \text{ e } \forall j; \quad (9)$$

$$x_{(i,j)} \leq u_{i,j}, \forall i \text{ e } \forall j; \quad (10)$$

A função objetivo (7) define o custo total do fluxo associado aos arcos e tem sentido de otimização definido para minimização.

As restrições (8) definem o fluxo resultante para cada uma das categorias de nós (positivos para fontes, negativos para sumidouros e nulo para os demais nós de ligação).

As restrições (9) limitam os fluxos nos arcos a valores não-negativos.

As restrições (10) limitam os fluxos às capacidades definidas para cada um dos arcos da rede.

A expansão da rede física ao longo do tempo, transforma a abordagem numa rede espaço-tempo, amplamente utilizada na resolução de inúmeros problemas de variadas naturezas. É recomendada por Assad (1980) para tratar problemas de distribuição de veículos ferroviários.

Esta expansão se faz necessária quando é preciso otimizar o fluxo através da rede em múltiplos instantes, determinando um horizonte temporal. Sob esta abordagem, cada localização física da rede é representada múltiplas vezes, tantas quantos forem os instantes a serem abrangidos na otimização.

Adaptando a rede da Figura 13, considerando um horizonte temporal formado por 4 instantes, e assumindo que a movimentação entre qualquer um dos 5 nós demora 1 passo (intervalo temporal entre cada um dos 4 instantes), a rede espaço tempo resultante seria:

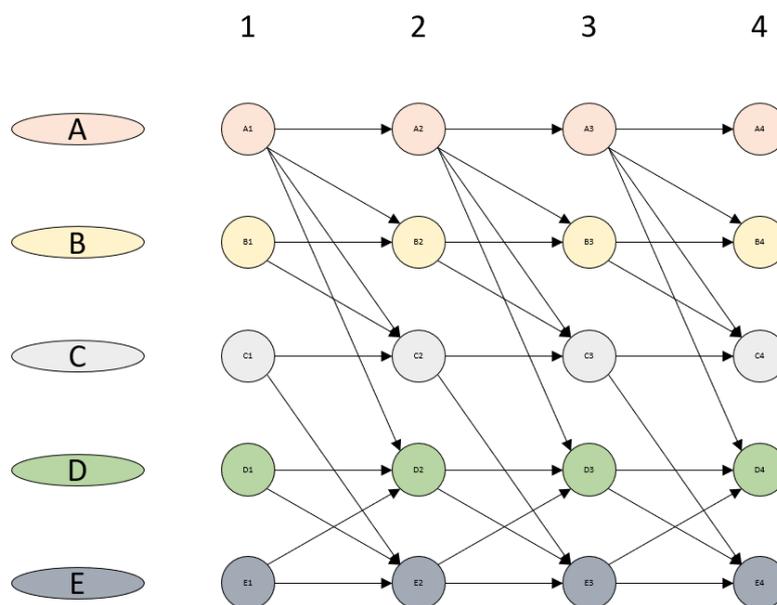


Figura 14: Expansão da rede ao longo do tempo. Fonte: O autor.

A Figura 14 mostra a rede espaço-tempo resultante da expansão, e considera a possibilidade de estocagem ao longo do tempo (fluxo ao longo do tempo permanecendo no mesmo espaço físico). Por exemplo de A1 para A2.

Uma expansão usual da modelagem apresentada, que amplia o potencial de aplicações representáveis, é a otimização de múltiplos produtos (*multicommodity*), ao inserir um novo índice na modelagem matemática capaz de absorver a pluralidade de produtos. No caso de uma aplicação do fluxo de veículos, características de uma frota heterogênea.

m: índice associado ao conjunto de mercadorias;

Função objetivo

$$\text{Min } Z = \sum_{n=1}^m \sum_{n=1}^i \sum_{n=1}^j x_{(m,i,j)} * c_{(m,i,j)} \quad (11)$$

Restrições

$$\sum_{n=1}^j x_{(m,i,j)} - \sum_{n=1}^i x_{(m,i,j)} = b_{(m,i)}, \forall i \text{ e } \forall m; \quad (12)$$

$$x_{(m,i,j)} \geq 0, \forall m, \forall i \text{ e } \forall j; \quad (13)$$

$$x_{(m,i,j)} \leq u_{(m,i,j)}, \forall m, \forall i \text{ e } \forall j; \quad (14)$$

As definições feitas em (11), (12), (13) e (14) são expansões feitas respectivamente das equações (7), (8), (9) e (10) ao incluir o conjunto de mercadorias m , tornando o modelo multiproduto.

Anexo 2 – Descrição didática do Pyomo

O Pyomo é um pacote de software de código aberto baseado em Python, com suporte a um conjunto de recursos dedicados à formular, resolver e analisar modelos de otimização. Centrado na modelagem de aplicativos de otimização estruturados, pode ser utilizado para definir problemas simbólicos gerais, criar instâncias de problemas específicos e resolvê-las utilizando *solvers* tanto comerciais quanto de código aberto. Os objetos de modelagem podem ser incorporados em linguagem de programação de alto nível criando aplicações diversas a outras linguagens de modelagem algébrica.

O Pyomo oferece suporte a ampla variedade de problemas, entre eles: programação linear, quadrática, não-linear, linear inteira mista, quadrática inteira mista, não-linear inteira mista, estocástica, disjuntiva generalizada, algébricas diferenciais, de dois níveis, problemas matemáticos com restrição de equilíbrio, dentre outros.

Por se tratar de uma linguagem interpretada (não compilada), pode ter um tempo de processamento maior do que uma aplicação dedicada compilada, e construída com outra linguagem de programação, mas possui como vantagem a facilidade de substituição do solver de otimização utilizado.

Exemplos de implementação de programas de otimização utilizando Pyomo estão disponíveis na internet, como o problema de transporte descrito a seguir, adaptado de Pyomo (2021):

O objetivo do problema de transportes exemplificado é definir o fluxo de um bem homogêneo ao longo de uma rede formada por diversas plantas de produção e vários mercados, de maneira a minimizar os custos de transporte.

O problema pode ser matematicamente modelado como um problema de programação linear através do modelo a seguir:

Índices utilizados

I: Conjuntos de plantas de produção;
 J: Conjuntos de mercados consumidores;

Parâmetros utilizados

$a_{(i)}$: Capacidade produtiva da planta i , $\forall i \in I$;
 $b_{(j)}$: Demanda no mercado j , $\forall j \in J$;
 $d_{(i,j)}$: Distância em milhas entre a planta i e o mercado j , $\forall i \in I$ e $\forall j \in J$;
 f : Frete em dólares por unidade e por milha percorrida;
 $c_{(i,j)}$: Custo em dólares por unidade transportada;
 $c_{(i,j)}$ é obtido exogenamente para a otimização $c_{(i,j)} = f * d_{(i,j)}$, $\forall i \in I$ e $\forall j \in J$;

Variáveis

$x_{(i,j)}$: remessa definida em quantidade de caixas;
 z : custo total de transporte em dólares;

Função objetivo

$$\text{Min } z = \sum_{n=1}^i \sum_{n=1}^j x_{(i,j)} * c_{(i,j)}; \quad (15)$$

Restrições

$$\sum_{n=1}^j x_{(i,j)} \leq a_{(i)}, \forall i \in I; \quad (16)$$

$$\sum_{n=1}^i x_{(i,j)} \leq b_{(j)}, \forall j \in J; \quad (17)$$

$$x_{(i,j)} \geq 0, \forall i \in I \text{ e } \forall j \in J; \quad (18)$$

Formulação no Pyomo

Em Pyomo tudo é tratado como objeto. Os componentes do modelo (conjuntos, variáveis, restrições e parâmetros) são todos atributos do objeto do modelo principal, embora sejam eles próprios objetos também.

O Pyomo possui basicamente dois tipos de modelo, concreto ou abstrato, sendo o primeiro aquele em que todos os dados são definidos no momento da criação do modelo, enquanto no modelo abstrato a estrutura é criada primeiro e em seguida instâncias particulares do modelo são geradas com um determinado conjunto de dados.

Para criação do modelo:

```
# Importação do módulo pyomo
from pyomo.environ import *
# Criação de um modelo concreto
model = ConcreteModel()
```

Para definição dos conjuntos:

```
# Conjuntos
```

```

# i plantas de produção / seattle, san-diego /
# j mercados / new-york, chicago, topeka / ;
model.i = Set(initialize=['seattle','san-diego'], doc='Canning plans')
model.j = Set(initialize=['new-york','chicago', 'topeka'], doc='Markets')

```

Para definição dos parâmetros:

```

# a(i) capacidade das plantas
# / seattle 350
# san-diego 600 /
# b(j) demanda dos mercados
# / new-york 325
# chicago 300
# topeka 275;
model.a = Param(model.i, initialize={'seattle':350,'san-diego':600},
doc='Capacity of plant i in cases')
model.b = Param(model.j, initialize={'new-york':325,'chicago':300,'topeka':275},
doc='Demand at market j in cases')
# Tabela d(i,j) distância em milhares de milhas
# new-york chicago topeka
# seattle 2.5 1.7 1.8
# san-diego 2.5 1.8 1.4;
dtab = {
('seattle', 'new-york') : 2.5,
('seattle', 'chicago') : 1.7,
('seattle', 'topeka') : 1.8,
('san-diego','new-york') : 2.5,
('san-diego','chicago') : 1.8,
('san-diego','topeka') : 1.4,
}
model.d = Param(model.i, model.j, initialize=dtab, doc='Distance in thousands of miles')
# frete in dólares por unidade por milhares de milhas /90/;
model.f = Param(initialize=90, doc='Freight in dollars per case per thousand miles')
# Parâmetro c(i,j) custo de transporte em milhares de dólares por unidade ;
# c(i,j) = f * d(i,j) / 1000 ;
def c_init(model, i, j):
return model.f * model.d[i,j] / 1000
model.c = Param(model.i, model.j, initialize=c_init, doc='Transport cost in thousands of dollar per case')

```

Para criação das variáveis:

```

# x(i,j) tamanho da remessa em unidades
# z custo total de transporte em milhares de dólares;
# x é uma variável estritamente positiva;
model.x = Var(model.i, model.j, bounds=(0.0,None), doc='Shipment quantities in case')

```

Para definição das restrições:

```

# supply(i) respeitar limite de suprimento
# supply(i) .. sum (j, x(i,j)) =/= a(i)
def supply_rule(model, i):

```

```

        return sum(model.x[i,j] for j in model.j) <= model.a[i]
    model.supply = Constraint(model.i, rule=supply_rule, doc='Observe
supply limit at plant i')
    # demand(j) satisfazer a demanda do mercado ;
    # demand(j) .. sum(i, x(i,j)) =g= b(j);
    def demand_rule(model, j):
        return sum(model.x[i,j] for i in model.i) >= model.b[j]
    model.demand = Constraint(model.j, rule=demand_rule, doc='Sa-
tisfy demand at market j')
    def supply_rule(model, i):
        supply = 0.0
        for j in model.j:
            supply += model.x[i,j]
        return supply <= model.a[i]

```

Para definir a função objetivo e resolução:

```

    # custo total .. z =e= sum((i,j), c(i,j)*x(i,j)) ;
    # Model transport /all/ ;
    # Solve transport using lp minimizing z;
    def objective_rule(model):
        return sum(model.c[i,j]*model.x[i,j] for i in model.i for j in model.j)
    model.objective = Objective(rule=objective_rule, sense=minimize,
doc='Define objective function')
    ## Definindo objetivo e resolução ##
    def objective_rule(model):
        obj = 0.0
        for ki in model.i:
            for kj in model.j:
                obj += model.c[ki,kj]*model.x[ki,kj]
        return obj

```

Para recuperar a solução:

```

    # Exibir x.l, x.m;
    def pyomo_postprocess(options=None, instance=None, re-
sults=None):
        model.x.display()

```