



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**APLICAÇÃO DO MODELO DE TRANSPORTE EM UMA
EMPRESA SIDERÚRGICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO
POR

EMANUELA MOURA BARBOSA DA SILVA

Orientadora: Prof. Suzana de França Dantas Daher, DSc

RECIFE, MARÇO, 2024

EMANUELA MOURA BARBOSA DA SILVA

**APLICAÇÃO DO MODELO DE TRANSPORTE EM UMA EMPRESA
SIDERÚRGICA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Engenharia de Produção da
Universidade Federal de
Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia de
Produção.

Orientadora: Prof. Suzana de França Dantas Daher

RECIFE, MARÇO, 2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Emanuela Moura Barbosa da .
Aplicação do Modelo de Transporte em uma empresa siderúrgica / Emanuela
Moura Barbosa da Silva. - Recife, 2024.
48 p. : il., tab.

Orientador(a): Suzana de França Dantas Daher
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Produção -
Bacharelado, 2024.

1. Programação Linear. 2. Problema de transporte. 3. Cadeia de suprimentos.
4. Siderúrgica. I. Daher, Suzana de França Dantas. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

EMANUELA MOURA BARBOSA DA SILVA

**APLICAÇÃO DO MODELO DE TRANSPORTE EM UMA EMPRESA
SIDERÚRGICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Produção.

Aprovado em: 19/03/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br SUZANA DE FRANÇA DANTAS DAHER
Data: 26/03/2024 09:52:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Suzana de França Dantas Daher (Orientadora)

Universidade Federal de Pernambuco **gov.br** MAISA MENDONÇA SILVA
Data: 26/03/2024 11:29:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Maísa Mendonça Silva (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco **gov.br** MARCIO JOSE DAS CHAGAS MOURA
Data: 26/03/2024 10:34:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Márcio José das Chagas Moura (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela força nos momentos difíceis e pela sabedoria nas incertezas, fortalecendo-me em minha jornada. Expresso minha gratidão a minha dedicada família, especialmente a minha mãe pela dedicação de uma vida, meu pai e meu esposo Lucas, pelo constante apoio. Reconheço o incentivo dos meus avós e tios Vilma e Vitor.

Sou grata pelas amizades que Deus, em sua imensa bondade, me concedeu na universidade, em especial: Vicente, Maria, Joana, Alexayene, Iury e Wesley que foram minha sustentação ao longo desses anos. Também agradeço aos amigos fora da universidade, como Jacikelly, Felipe, Brenda, Paula e Erick que foram meu suporte emocional ao longo dessa caminhada.

Por fim, estendo meus agradecimentos a minha orientadora Suzana Daher pela paciência e dedicação na elaboração deste trabalho.

Resumo

A pesquisa aborda a formulação de um problema de transporte que busca a alocação eficiente de um produto com diferentes origens para vários destinos, visando a minimização dos custos de transporte. Este tipo de problema tem aplicação em diversos setores econômicos, tais como transportes urbanos, indústria de bens de consumo, indústrias de processos etc. A indústria do aço, que engloba desde a extração de minério de ferro e carbono até a produção do material, é essencial para setores-chave como construção civil e automotivo. O Brasil figura entre os dez maiores produtores de aço do mundo, desempenhando um papel crucial na economia. Um estudo de caso foi desenvolvido para a regional nordestina de uma metalúrgica brasileira de grande porte, que precisa definir a melhor forma de atender às lojas comerciais da sua rede de distribuição, considerando que as três usinas da região têm restrições de capacidade, implicando em restrições de oferta. Ademais, o estudo incorpora também a necessidade de considerar uma prioridade de cada loja determinada pelo grau de criticidade do estoque da loja no momento que o modelo é aplicado. Os resultados obtidos com os cenários analisados indicam benefícios para a empresa como diminuição de custos totais de transporte, a maior agilidade no processo de alocação/distribuição da carga e a redução do tempo de tomada de decisão uma vez que um modelo estruturado passa a ser adotado para alocação das cargas. O modelo limitou-se a entrega de um único tipo de produto, mesmo sabendo que no sistema real outras informações tais como tipo do veículo e uma combinação de produtos por veículos devam ser consideradas. Essas melhorias são apresentadas como trabalhos futuros.

Palavras-chaves: programação linear; problema de transporte; cadeia de suprimentos; siderúrgica.

Lista de Figuras

Figura 1. Evolução das publicações sobre o problema de transporte utilizando programação linear	11
Figura 2. Esquematização do Problema de Transporte	18
Figura 3. Rede de origens (usinas) e destinos (lojas)	25
Figura 4. Fluxograma do processo de alocação dos produtos para as lojas	29
Figura 5. Comparativo C1 como coef. de priorização x Ca s/o coef.(qnt)	36
Figura 6. Comparativo C2 como coef. de priorização x C2 s/o coef.(qnt)	38

Lista de Tabelas

Tabela 1. Matriz de transporte	30
Tabela 2. Classes de priorização	32
Tabela 3. Dados do cenário 1	35
Tabela 4. Comparativo C1 percentual de atendimento	36
Tabela 5. Dados do cenário 2	37
Tabela 6. Comparativo C2 percentual de entregas	39
Tabela 7. Dados do cenário 3	40
Tabela 8. Comparativo C3 percentual de entregas	42
Tabela 9. Variação dos valores k	44

Sumário

1.	Introdução	8
1.1	Justificativa e relevância	9
1.1	Objetivos	11
1.2	Metodologia	11
1.3	Estrutura do trabalho	12
2.	Conceitos básicos e trabalhos relacionados	13
2.1	Programação Linear	14
2.2	Problema de transporte	15
2.3	Trabalhos relacionados	17
2.4	Resumo do capítulo	21
3.	Estudo de caso e modelo proposto	22
3.1	Descrição da empresa e contextualização do problema	22
3.2	Cenário atual	24
3.3	Fluxograma do processo	26
3.4	Modelo Proposto	29
3.5	Resumo do capítulo	32
4.	Resultados	33
4.1	Cenário 1: Situação cotidiana, com lojas de diferentes prioridades	33
4.2	Cenário 2: Todas as lojas com prioridade máxima	35
4.3	Cenário 3: Todas as lojas com prioridade mínima e layoff de uma das usinas	38
4.5	Análise de sensibilidade do valor k	42
4.6	Discussão sobre os resultados	43
4.7	Resumo do capítulo	46
5.	Conclusão	47
	Referências	49

1. Introdução

O parque siderúrgico brasileiro se configura por meio de 15 empresas de caráter privado, controladas por 11 grupos empresariais distintos, que gerenciam um total de 31 usinas distribuídas em 10 estados do país (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022). Em 2022, a indústria do aço no Brasil alcançou uma produção de 34,1 milhões de toneladas de aço bruto, posicionando-se como o nono maior produtor mundial. Esses números refletem a significativa contribuição do setor siderúrgico brasileiro para a economia global e evidenciam a sua relevância no cenário internacional (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2022).

Em território nacional, tem-se dois tipos de usinas siderúrgicas: as usinas integradas e as semi-integradas. A escolha entre esses dois modelos de usinas é orientada por variáveis como a disponibilidade de matérias-primas, custos de produção e a dinâmica da demanda no mercado. As usinas siderúrgicas integradas são aquelas cujas instalações conduzem integralmente o processo de produção de aço, desde a extração do minério de ferro até a fabricação do produto final, envolvendo toda a cadeia de suprimentos e utilizando matérias-primas fundamentais, como minério de ferro, carvão coqueificável e calcário. Usinas integradas frequentemente incorporam altos-fornos para a produção de ferro-gusa e possuem autossuficiência na geração de sua energia. Por sua vez, as usinas semi-integradas desempenham uma participação parcial no processo produtivo do aço, sendo um dos elementos da cadeia de suprimentos. Em geral, fazem uso de produtos semiacabados ou de aço reciclado como matéria-prima e em determinadas unidades produtivas dependem mais de fornos elétricos do que de altos-fornos. Essas diferenças entre as usinas refletem a complexidade das considerações estratégicas envolvidas na sua configuração e operação, sendo crucial para a eficiência e competitividade da indústria.

A empresa deste estudo de caso possui os dois tipos de configurações, bem como a sua regional analisada. Nesta regional são produzidos diversos itens intermediários e finais, tais como vergalhões, treliça, prego, fio máquina e dentre outros. A maior parte dos produtos são utilizados na construção civil, mas existem itens que são utilizados como matéria-prima nas outras indústrias, tais como famílias específicas do fio máquina que após o processo de trefilação

podem se transformar na palha de aço, muito utilizada como um produto de limpeza.

Mesmo tendo um bom mix de produtos, a empresa deste estudo de caso enfrenta dificuldades para equalizar a produção e a distribuição dos mesmos. Em alguns cenários, a capacidade produtiva é inferior à demanda total do mercado e a empresa necessita dimensionar a distribuição dos produtos, tendo dentre vários fatores a serem considerados, os custos associados ao frete. Há diferentes tipos de clientes: as filiais (que podem ser entendidas como lojas próprias) e os clientes de venda direta (em sua maioria, construtoras e distribuidores do ramo da construção civil). A produção precisa ser repartida entre esses clientes de forma a atender ao maior número possível de lojas e evitar problemas maiores com clientes estratégicos de diferentes regiões do país. Desta forma, o problema em foco é como distribuir os produtos com base nas unidades demandadas, priorizando atender os casos mais críticos, mas otimizando também os custos de transporte.

A programação linear (PL) é uma ferramenta matemática altamente versátil e que pode desempenhar uma função importante na otimização de processos e na orientação de escolhas estratégicas em variados problemas de decisão em diferentes contextos corporativos. A utilização da programação linear tem o potencial de proporcionar uma notável vantagem competitiva para as empresas. Essa vantagem pode se manifestar por meio da diminuição de despesas operacionais, a introdução de inovações e o aprimoramento dos procedimentos impulsionados por *insights* criativos.

Dentre os resultados esperados deste trabalho está a possibilidade de apoiar a empresa estudo de caso com um modelo matemático para um melhor planejamento da distribuição de produtos para as suas lojas comerciais, considerando restrições de custo de transporte e de oferta, bem como não comprometendo o abastecimento mínimo aos clientes estratégicos.

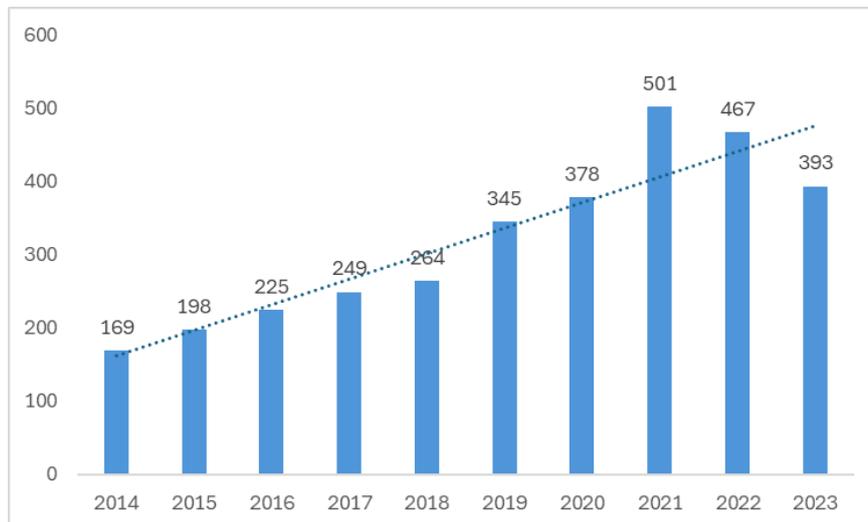
1.1 Justificativa e relevância

Segundo Golbarg & Luna (2005), a pesquisa operacional é uma ciência responsável por desenvolver métodos quantitativos voltados para problemas de otimização de processos. Essa será a linha considerada durante este estudo, donde busca-se utilizar a programação matemática, um dos principais modelos

da pesquisa operacional, para descrever e representar o problema logístico de transporte de materiais quando a demanda é maior que a oferta aplicado em uma empresa siderúrgica.

No ambiente acadêmico, pesquisas utilizando a programação linear (PL) para trabalhar problemas de transporte têm crescido nos últimos anos. A Figura 1 foi construída com base nas publicações disponibilizadas na plataforma *Web of Science*, donde é possível visualizar o incremento nas pesquisas com a temática da Programação Linear (PL) nos últimos nove anos, mencionando em particular os estudos voltados ao problema do transporte (palavras chaves adotadas foram “*transportation problem*” AND “*linear programming problem*”).

Figura 1. Evolução das publicações sobre o problema de transporte utilizando programação linear



Fonte: *Web of Science* (2024).

Esta tendência é refletida em um volume total de 3.189 trabalhos ao longo desses anos, traduzindo-se em uma média anual de 318 publicações/ano. Este panorama reforça a importância que este tema pode trazer para as organizações, ilustrando o quão atrativo é empregá-lo como uma via para alcançar melhoria de resultados.

A empresa considerada na pesquisa enfrenta o desafio de padronizar e estruturar a tomada de decisão associada à distribuição de seus produtos, de modo a atender um maior número de lojas, mesmo diante das restrições, evitando problemas com clientes estratégicos em diferentes regiões. A análise

deste estudo concentra-se no fornecimento para 19 lojas comerciais (LC), examinando os desafios de abastecimento enfrentados por elas. Esta análise abrange a produção direcionada ao fornecimento desse tipo de cliente, que representa 50% da produção total da regional NNE (Norte-Nordeste). O trabalho mostra-se relevante para aumentar a eficiência operacional da organização e alinhado às necessidades de avanços na literatura científica, uma vez que não foi encontrado trabalhos que tratem do problema com as mesmas necessidades e restrições da empresa estudo de caso.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é a proposição de um modelo de programação linear para otimizar a distribuição de produtos para um conjunto de lojas quando há restrição de capacidade numa indústria siderúrgica.

Para alcance desse resultado, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Entendimento do problema e levantamento dos dados;
- Desenvolvimento do modelo matemático baseado no problema de programação linear para transporte;
- Aplicação de cenários e análise dos resultados obtidos com o modelo proposto.

1.2 Metodologia

Segundo Cauchick (2012), quando o método pode ser descrito como dedutivo, as variáveis devem ser medidas através da teoria que direciona a pesquisa. Dessa maneira, seguindo a metodologia presente na resolução de um problema de transporte, através de um modelo já definido e bem estruturado com base na Programação Linear, a linguagem matemática será utilizada para encontrar uma melhor solução, caracterizando o estudo como quantitativo quando se refere a sua natureza. A metodologia possui finalidade aplicada por abordar uma parte específica do setor logístico de uma siderúrgica e apresentar ênfase na implementação efetiva e relevância direta para as necessidades da empresa. Com a modelagem, busca-se auxiliar o processo da tomada de

decisão associado ao transporte logístico, admitindo um cenário de escassez do produto e trazendo uma maior fundamentação para decisão final.

O estudo é classificado como descritivo quanto ao objetivo, uma vez que pretende descrever a utilização do modelo no problema de decisão identificado, buscando gerar uma contribuição para a organização através da minimização de custos proposta em sua estrutura.

Já em relação aos dados, será realizada uma modelagem de problema em pesquisa operacional, através de uma teoria bem desenvolvida que compreende o uso de técnicas matemáticas para descrever o funcionamento de um sistema ou parte de um sistema produtivo (BERTO; NAKATO; 2000). Por ser a reprodução de um sistema da empresa será utilizado o procedimento do estudo de caso que, segundo Baxton (1990), é a história de um fenômeno, passado ou corrente, desenhado a partir de múltiplas fontes de evidência, nas quais se incluem dados obtidos tanto em observações diretas e entrevistas sistemáticas, como em arquivos públicos ou privados. Cada fato relevante para o conjunto de eventos descritos no fenômeno é um dado potencial para o Estudo de Caso.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira. O Capítulo 1 apresenta a motivação do estudo, destacando também os seus objetivos e a metodologia adotada. O Capítulo 2 apresenta os conceitos básicos envolvidos no desenvolvimento de um problema de transporte e alguns trabalhos relacionados. O Capítulo 3 apresenta o modelo proposto para o problema de transporte da empresa estudo de caso. Em seguida, no Capítulo 4 tem-se os resultados de cenários de estudo considerados para este trabalho. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e as sugestões para a continuidade do trabalho.

2. Conceitos básicos e trabalhos relacionados

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos do modelo de transporte da pesquisa operacional e alguns trabalhos recentes relacionados ao tema.

Hilier & Lieberman (2006) mencionam que as raízes da Pesquisa Operacional (PO) remontam a muitas décadas atrás, quando foram iniciadas tentativas de empregar uma abordagem científica na gestão de organizações. Entretanto, o marco inicial dessa disciplina, é frequentemente associado às atividades militares durante os primeiros anos da Segunda Guerra Mundial. Devido às necessidades impostas pela guerra, surgiu uma urgência em alocar de maneira eficiente os recursos limitados para as diferentes operações militares e atividades internas de cada operação.

Como resultado, os comandos militares britânico e norte-americano convocaram muitos cientistas para realizar a aplicação de uma abordagem científica na resolução desses e de outros problemas táticos e estratégicos. Esses cientistas foram incumbidos de conduzir pesquisas relacionadas a operações militares. Essas equipes pioneiras na Pesquisa Operacional foram responsáveis pelo desenvolvimento de métodos eficazes para a utilização da inovadora tecnologia de radar, desempenhando um papel crucial na vitória da Batalha Aérea sobre os céus da Grã-Bretanha. Por meio de investigações que visavam aprimorar a gestão de operações de comboios e ações antissubmarino, esses cientistas desempenharam um papel vital no sucesso da Batalha do Atlântico Norte. Esforços semelhantes também contribuíram para o êxito da Campanha Britânica no Pacífico (HILIER; LIEBARMAN; 2006).

Ainda sobre a perspectiva dos autores, assim como sugere a denominação, a Pesquisa Operacional se dedica à "investigação das operações". Por conseguinte, sua aplicação reside na resolução de questões relacionadas à gestão e coordenação das operações, ou seja, das atividades, dentro de uma organização. A característica fundamental das organizações é considerada secundária nesse contexto, uma vez que a PO tem sido amplamente utilizada em setores tão diversos quanto manufatura, transporte, construção, telecomunicações, planejamento financeiro, saúde, atividades

militares e serviços públicos, entre outros. Assim, a amplitude de aplicações é notavelmente vasta.

Ao desenvolver um modelo matemático, é necessário incorporar simplificações razoáveis do sistema ou questão real (em diversos graus) e a confirmação da validade do modelo está intrinsecamente ligada à capacidade do mesmo em produzir resultados coerentes com o contexto original. Assim, o modelo matemático consiste em uma representação simplificada (abstrata) do problema real, devendo conter detalhes adequados para capturar os elementos fundamentais da situação, porém também ser suficientemente manipulável através de métodos de resolução (ARENALES *et al.*, 2011).

2.1 Programação Linear

Segundo Antunes *et al.* (2011) a prática científica pode ser considerada como a habilidade de observar e elucidar diversos fenômenos naturais, sociais, econômicos e outros, a Matemática desempenha um papel crucial na explicação desses fenômenos. A partir da análise de fenômenos, processos ou sistemas, que podem variar entre físicos, químicos, biológicos e econômicos, busca-se identificar princípios que os governam. Quando esses princípios podem ser expressos através de relações matemáticas, surgem os modelos matemáticos. Nesse contexto, o termo "modelo" se refere a uma representação abstrata que procura emular as características essenciais de um objeto real com o propósito de representá-lo.

A programação linear emprega um modelo matemático para representar a situação problemática. O termo "linear" indica que todas as funções matemáticas presentes nesse modelo são restritas a funções lineares. A palavra "programação" aqui não se refere à codificação de computadores; ela equivale, em essência, a uma descrição do planejamento. Assim sendo, a programação linear consiste em elaborar planos de ação para alcançar um resultado ideal, ou seja, uma solução que otimize o objetivo específico (conforme delineado pelo modelo matemático) dentre todas as alternativas viáveis (HILIER; LIEBARMAN; 2006).

Apesar de distribuir recursos para atividades ser a aplicação mais frequente, a programação linear apresenta diversas outras aplicações de relevância. De fato, qualquer problema cujo modelo matemático se encaixe na

estrutura genérica do modelo de programação linear é considerado um problema nessa categoria (HILIER; LIEBARMAN; 2006).

O Problema de Programação Linear (PPL), pode ser escrito como da seguinte forma (GOLDBARG; LUNA; 2005):

$$\text{Min ou Max } c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + \dots + c_nx_n$$

Sujeito a

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1n}x_n \quad [sinal] \quad b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2n}x_n \quad [sinal] \quad b_2 (\dots)$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{m3}x_3 + \dots + a_{mn}x_n \quad [sinal] \quad b_m$$

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \geq 0$$

Em que:

- $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ são as variáveis de decisão;
- $c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ são os coeficientes (números reais) da função objetivo;
- b_1, b_2, \dots, b_m são as de cada uma das restrições, sendo número reais;
- a_{ij} são os coeficientes das restrições, sendo números reais;
- o símbolo $[sinal]$ indica que a restrição pode ser uma equação ou uma inequação

2.2 Problema de transporte

O problema do transporte é uma questão clássica na Pesquisa Operacional e otimização, com aplicações em logística, distribuição e planejamento de transporte. Embora sua formulação remonte ao século XVIII, foi no século XX que ganhou destaque com o desenvolvimento de métodos matemáticos eficientes para sua resolução. A formulação formal do problema envolve a alocação ótima de mercadorias de diversas origens para múltiplos destinos, visando a minimização dos custos associados ao transporte. O objetivo é encontrar um plano de transporte que minimize o custo total, levando em consideração as capacidades de oferta e demanda em cada origem e destino.

Matemáticos como Hitchcock (1941), Dantzig (1947) e Koopmans (1949) foram pioneiros ao abordar o problema de transporte. George Dantzig, especialmente, desempenhou um papel significativo no desenvolvimento da programação linear, contribuindo com o algoritmo do método simplex, aplicável à eficiente resolução de problemas de transporte. Ao longo do tempo, surgiram várias variações e extensões do problema, incluindo considerações sobre capacidades limitadas, custos não lineares e restrições adicionais. As soluções encontradas têm aplicações diversas em indústrias, desde a distribuição de produtos até o planejamento de redes de transporte público. O crescimento econômico e a expansão de mercados impulsionaram a necessidade de distribuir eficientemente mercadorias entre diferentes origens e destinos. Como destacado por George Dantzig em 1947, seu trabalho pioneiro ressaltou a importância do problema na distribuição de bens e serviços. Durante a Segunda Guerra Mundial, o problema de transporte se tornou crítico na logística militar, influenciando o desenvolvimento de métodos matemáticos para resolver problemas logísticos, como documentado por Hitchcock em 1941.

O problema de transporte pode ser representado por um problema de programação linear e pode ser compreendido como a tarefa de movimentar os produtos gerados em fontes ou centros de produção de uma organização industrial para seus depósitos ou pontos de distribuição. O propósito fundamental deste problema é identificar a solução ótima, minimizando custos, para efetuar o transporte dos produtos através das rotas disponíveis. Portanto, a solução deve determinar as quantidades a serem enviadas e para quais destinos, de forma a atender às demandas com o menor custo viável. As quantidades produzidas ou disponíveis em cada centro e as quantidades necessárias em cada mercado consumidor são informações previamente conhecidas. O transporte deve ser conduzido de maneira que respeite as limitações de produção e atenda às exigências de demanda (ARENALLES et al., 2015).

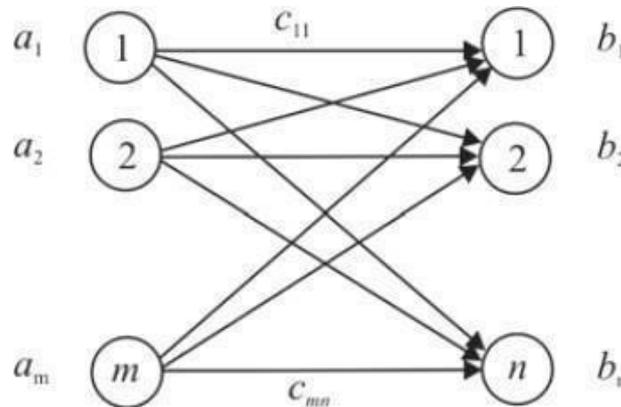
Os centros de produção ou unidades de suprimentos podem ser designados como origens e os mercados consumidores que são as unidades de demanda como destinos. Supondo que existam m origens e n destinos para um produto, sendo o custo de transportar uma unidade desse produto da origem i para o destino j representado por c_{ij} . Além disso, a oferta do produto na origem i

é a_i , e a demanda do produto no destino j é b_j . Uma representação gráfica das origens, destinos, disponibilidades do produto e demandas é apresentada na Figura 2.

As variáveis do problema correspondem às quantidades transportadas das origens para os destinos, denotadas por x_{ij} , onde x_{ij} é a quantidade transportada do produto da origem i para o destino j . Essas quantidades não podem ser negativas, portanto, as restrições $x_{ij} \geq 0$, para $i = 1, \dots, m$ e $j = 1, \dots, n$, são incorporadas ao modelo matemático. Se x_{ij} é a quantidade transportada do produto da origem i para o destino j , então $c_{ij} * x_{ij}$ é o custo associado a esse transporte. O custo total de transporte é a soma dos custos de transporte de todas as quantidades transportadas de todas as origens i para todos os destinos j , ou seja, $\sum \sum c_{ij} * x_{ij}$. O objetivo é minimizar esse custo.

É conhecido que o que é transportado de cada origem i para todos os destinos j , onde $j = 1, 2, \dots, n$, não pode ultrapassar a quantidade disponível de produto na origem i , pois não é possível entregar um volume maior que a capacidade de produção da origem, ou seja, $\sum x_{ij} \leq a_i$. Junto a isso, é desejado que as quantidades transportadas das diversas origens para o destino j satisfaçam a demanda requerida neste destino, ou seja, $\sum x_{ij} = b_j$.

Figura 2. Esquemática do Problema de Transporte



Fonte: Arenales (2011).

2.3 Trabalhos relacionados

Li, Jin & Wang (2014) abordam a programação estocástica, um problema significativo em diversos domínios como agendamento de produção, localização

de instalações e gestão logística. O foco está na criação de modelos solucionáveis, com ênfase em três abordagens amplamente reconhecidas: o modelo de valor esperado, o modelo de programação com restrições de chance e o modelo de programação dependente da chance. Apesar de ampla aplicação, esses modelos apresentam deficiências, como a incapacidade do modelo de valor esperado em lidar efetivamente com diferentes riscos. O artigo propõe uma solução baseada no modelo de programação com restrições de chance, introduzindo um padrão quase linear com base em expectativa e variância, junto com o conceito de coeficiente de confiabilidade. O coeficiente de confiabilidade é analisado em relação ao grau de confiabilidade, fornecendo estratégias de seleção. Um modelo de programação quase linear para o problema de transporte estocástico é então estabelecido e avaliado por meio de um exemplo. Os resultados indicam que este modelo pode resolver efetivamente problemas de transporte estocástico em ambientes complexos ou com informações incompletas, apresentando simplicidade operacional, boa interpretabilidade e baixa complexidade computacional. Esta abordagem não apenas incorpora preferências subjetivas na tomada de decisões, mas também otimiza o desempenho do sistema, contribuindo assim para a base teórica e prática no campo da programação estocástica.

Bargos *et al.* (2016) investigam a otimização das localizações para usinas de açúcar e etanol no estado de São Paulo, grande produtor mundial de cana-de-açúcar. Utilizando técnicas de pesquisa operacional, o problema p-mediano é formulado como um problema de programação linear binária. Os dados do projeto CANASAT, que mapeia as áreas cultivadas com cana-de-açúcar, são analisados, e duas abordagens são comparadas para encontrar soluções: o pacote de otimização MATLAB© e um algoritmo heurístico. Os resultados indicam diferenças nas distâncias entre os métodos, destacando a eficiência do MATLAB©, embora mais lento em termos de CPU. O estudo aponta para a confiabilidade das distâncias euclidianas em estudos de localização de usinas. Limitações são identificadas, como a alocação exclusiva da produção de um município a uma única usina.

Belmar, Montero & Leonardini (2022) abordam um problema complexo de logística relacionado à coleta de leite em uma empresa de laticínios no sul do Chile, considerando diferentes tipos de leite, centros de coleta e a rota dos

veículos. O estudo propõe um modelo matemático de programação linear inteira mista, uma abordagem de três estágios e uma heurística de busca local iterativa para resolver essa questão multifacetada, considerando tanto decisões estratégicas quanto operacionais. Os resultados indicam que a inclusão de centros de coleta de leite é essencial para reduzir os custos de transporte, e centros de maior capacidade podem proporcionar reduções adicionais de custo, embora aumentem o uso de caminhões menores. A flexibilidade do modelo é destacada, considerando a fixação das localizações dos centros de coleta. A eficiência da heurística de busca local iterativa é evidente em termos de tempo de processamento e custos, sugerindo uma abordagem combinada para melhorar os resultados.

Acuna (2017) aborda a questão crítica do transporte de madeira e biomassa na indústria florestal, destacando sua significativa parcela nos custos operacionais globais. Diante desse desafio, a pesquisa propõe soluções de otimização, incluindo modelos de programação linear e algoritmos, visando a eficiente organização das operações de transporte, alocação de recursos e a mitigação do impacto ambiental. O estudo apresenta uma visão abrangente dessa problemática, envolvendo decisões estratégicas e operacionais em diferentes escalas temporais. Além disso, são introduzidas duas ferramentas de apoio à decisão, MCPLAN e FastTRUCK, projetadas para auxiliar os planejadores de transporte na otimização dos fluxos de madeira e biomassa da floresta para fábricas e usinas de energia, bem como na roteirização eficiente dos caminhões. Dada a oportunidade substancial para implementação de soluções baseadas em Pesquisa Operacional (PO) no setor, a pesquisa destaca a importância do desenvolvimento de conhecimentos técnicos e habilidades para lidar com os desafios crescentes na gestão das cadeias de suprimentos florestais.

Skrinjar, Rogic & Stankovic (2012), investigam os desafios associados aos problemas de localização de terminais logísticos urbanos, tratando-os como problemas difíceis e não polinomiais pertencentes à classe NP. Esses problemas têm aplicação ampla em sistemas de transporte e telecomunicações, especialmente em redes de centros logísticos, distribuição e terminais de carga em grandes cidades. O estudo aborda a alocação única de *hubs*, apresentando um modelo matemático para a seleção estratégica de suas localizações na rede

urbana. Métodos exatos e heurísticos são analisados em termos de implementação para resolver problemas de localização em larga escala, destacando as dificuldades computacionais associadas a problemas NP. Os resultados numéricos indicam que o uso de hubs para consolidar mercadorias resulta em redução de custos de transporte, aproveitando melhor o espaço de carga dos veículos e contribuindo para uma distribuição mais eficiente. A introdução de centros logísticos (hubs) nas cidades demonstra benefícios, como a redução do congestionamento do tráfego urbano e a utilização de veículos menores para a entrega de mercadorias. Os métodos discutidos têm aplicabilidade na concepção de redes de transporte de encomendas, tanto interurbanas quanto urbanas, e na otimização de redes já existentes, visando melhorias nos custos de transporte e na utilização de recursos. Além disso, destaca-se a necessidade de modelos dinâmicos de localização para monitorar mudanças ao longo do tempo, e algoritmos genéticos são identificados como eficazes na resolução desses problemas, tanto para modelos estatísticos quanto dinâmicos.

Ao percorrer distintos setores, torna-se evidente como a questão do transporte impacta a todos, oferecendo oportunidades significativas para aprimoramentos nos processos e reduções de custos. Adicionalmente, observa-se que o conceito do problema de transporte frequentemente está vinculado a metodologias e ferramentas visando otimizar os resultados da pesquisa. No entanto, ao revisar a literatura, constata-se a ausência de aplicações diretas no setor de siderurgia, objeto de estudo desta pesquisa. Essa lacuna revela uma área de investigação promissora, onde a adaptação e aplicação de abordagens bem-sucedidas em outros setores podem fornecer *insights* valiosos e soluções inovadoras para os desafios específicos enfrentados pela indústria siderúrgica no contexto do transporte. Dessa forma, a presente pesquisa busca preencher essa lacuna ao explorar e adaptar metodologias existentes para otimizar as operações logísticas no neste setor, contribuindo assim para o avanço do conhecimento e eficiência do processo.

2.4 Resumo do capítulo

Neste capítulo apresentou-se uma breve revisão histórica e matemática do modelo de programação linear e, mais especificamente, o modelo de transporte. Apresentou-se também alguns trabalhos relacionados ao tema.

No próximo capítulo, será apresentado o cenário do estudo de caso e o modelo proposto para resolução do problema.

3. Estudo de caso e modelo proposto

O estudo aborda a distribuição de materiais quando a capacidade produtiva é insuficiente para atender à demanda, buscando cumprir um bom nível de atendimento, sem deixar de lado os custos associados ao frete desses itens. O estudo busca aplicar o Problema de transporte, um modelo de Programação Linear, para otimizar o processo de abastecimento dessas unidades, considerando aspectos como a priorização de casos críticos e otimização de custos de transporte.

3.1 Descrição da empresa e contextualização do problema

O presente trabalho foi aplicado em uma multinacional brasileira atuante desde as etapas iniciais da produção de aço até a fabricação de produtos. A organização está entre as principais fornecedoras de aços longos nas Américas e apresenta clientes de setores diversificados como construção civil, maquinários, energia, indústria automotiva e naval. A empresa foi fundada em 1901 através da aquisição de uma fábrica de pregos localizada em Porto Alegre no estado do Rio Grande do Sul.

Segundo dados divulgados no ano de 2020, o grupo apresentava uma disposição de 32 unidades produtoras de aço, 75 lojas comerciais, 2 minas de minério de ferro e presença em 9 países. Este trabalho analisou, especificamente, a Regional Norte-Nordeste (NNE) que envolve 3 usinas, localizadas em Caucaia e Maracanaú no estado do Ceará e a terceira na região metropolitana do Recife no estado de Pernambuco. O material produzido nessas 3 usinas abastece as 19 lojas comerciais e alguns clientes diretos. A venda direta ocorre quando a equipe comercial faz o trabalho de captação e consegue fechar um acordo com o comprador. Para um cliente direto alocar um pedido de material na usina é necessário cumprir alguns pré-requisitos, tais como o pedido mínimo, que pode variar por produto. Esses clientes ainda podem ser classificados em clientes do mercado interno (MI) e clientes do mercado externo (ME). Cliente MI são em sua maioria por empresas de construção civil ou distribuidoras desses materiais e as lojas comerciais (LC). Por sua vez, clientes do mercado externo (ME) apresentam uma demanda puxada e ocorre através da produção de material para exportação.

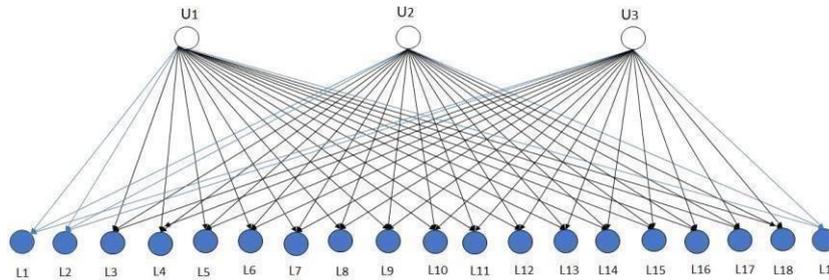
Com o intuito de entender melhor o problema da empresa, este trabalho restringe-se ao mercado das lojas comerciais (LC). Sabe-se que 50% da produção total das usinas pertencentes a regional analisada deve ser direcionada para esse mercado, mas que em diversos momentos a capacidade produtiva não é capaz de atender às demandas de todas as filiais. O planejamento da distribuição - quais lojas serão abastecidas e com quais quantidades - é feito de forma pouco estruturada.

No cenário atual, a previsão de venda adotada detalha a demanda do MI para o mês futuro $M+1$, e nela constam os grupos de produtos e os volumes demandados. Desta forma, o plano de abastecimento das lojas comerciais (LC) segue a mesma linha de raciocínio, são arquivos de planejamento que servem como inputs para a equipe de programação e controle de produção. É desejado que seja cumprido um equilíbrio de mercados, ou seja, repartindo a produção meio a meio para atendimento de ambos os mercados (clientes estratégicos diretos e lojas comerciais). O equilíbrio é muito importante, pois da mesma forma que um cliente de MI como as grandes construtoras do estado não podem ficar sem o material, as lojas filiais também não podem estar desabastecidas ou seus clientes acabam precisando comprar na concorrência. Esse equilíbrio de mercados é atualmente um desafio para organização, mas não será abordado neste trabalho, sendo uma sugestão para trabalhos futuros.

A observação deste estudo estará voltada ao mercado LC, acompanhando o desafio de abastecimento enfrentado para as lojas comerciais, considerando a produção direcionada pelo plano de abastecimento das lojas, ou seja, 50% da produção total da regional NNE. Como são 19 unidades, nem sempre a capacidade produtiva direcionada para esse mercado é suficiente para atender as demandas de todas as lojas em um determinado período. Quando esse desbalanceamento acontece é necessário decidir: qual unidade terá sua demanda atendida? Quanto mandar para cada unidade? Qual o custo associado? Com essas perguntas surge o direcionamento deste estudo que busca utilizar a aplicação de um modelo da Programação Linear para resolver um problema de transporte e observar aspectos associados a essa decisão. A Figura 3 é a representação gráfica do problema, onde no grafo apresentado os nós fontes são as usinas e os nós destino são as lojas. As flechas representam

que há transporte de carga entre esses pontos e, neste estudo, está associado ao custo do frete pré-estabelecido.

Figura 3. Rede de origens (usinas) e destinos (lojas)



Fonte: Esta pesquisa (2024).

3.2 Cenário atual

O abastecimento das lojas é realizado com base em um *dashboard* disponível na plataforma *Power BI*. Com o auxílio desses dados é possível visualizar a listagem das unidades e suas respectivas demandas. Um arquivo chamado Relatório de GAPs apresenta as lacunas de abastecimento existentes. Esse relatório apresenta também informação sobre o volume de pedidos já implantados pelos clientes em cada loja, o volume de abastecimento necessário para que todas as unidades atinjam o estoque de segurança e a quantidade dos itens necessários para que atingissem o estoque máximo do produto numa filial. *Quando a capacidade atende à demanda:*

Para este cenário, onde a quantidade produzida na usina é suficiente para abastecer todas as lojas ao mesmo tempo, não seria necessário decidir para quais lojas enviar o material.

Quando a capacidade não atende à demanda:

Diante da restrição de capacidade enfrentada pela empresa, existe o desafio de decidir quais lojas receberão produtos e em quais quantidades. No cenário atual, foi incluído no Relatório de GAPs uma classificação para as necessidades das lojas, sendo possível visualizar se o material demandado em uma dada unidade está totalmente em falta, se está abaixo do estoque mínimo, ou se é para recompor o estoque ao seu nível máximo. Essas três categorias foram nomeadas de “Falta”, “ E_{min} ” e “ $E_{máx}$ ”, donde:

- **GAP Falta:** o primeiro e mais crítico. Ele ocorre quando a loja já tem um pedido formalizado por um cliente, mas não dispõe do produto porque a usina ainda não enviou, impedindo o atendimento/finalização da venda. Nesse caso, o atraso na entrega corrobora para a insatisfação do cliente, que pode cancelar a compra e fazê-la na concorrência. Além disso, esse pode ser um cliente que não retornará mais a loja devido à experiência negativa vivenciada.
- **GAP E_{min} :** ele ocorre quando a filial está abaixo do estoque mínimo do produto, ou seja, um limiar de reabastecimento definido a partir de histórico de pedidos para que não falte material na loja.
- **GAP $E_{máx}$:** é o menor nível de criticidade. Ele descreve a situação em que o material demandado é enviado apenas para atingir o estoque máximo da unidade, definido a partir da capacidade física de armazenamento da loja comercial. Em outras palavras, o estoque mínimo da loja já seria capaz de atender a um pedido típico de compra, mas ao enviar os produtos para estas lojas, as usinas liberam suas próprias áreas de armazenamento (expedição) e podem produzir mais produtos.

Devido ao risco de oxidação, não é indicado que o produto fique muito tempo parado no estoque (seja de uma usina ou de uma loja), mas em alguns momentos o estoque máximo é adotado, seja para atender picos de demanda do mercado, seja para antecipação de produção.

Apesar dos esforços da equipe responsável pelo abastecimento que no cenário atual verifica o Relatório de GAPs, prioriza-se as lojas que estão sinalizadas como “Falta” e realiza-se os envios dos produtos. Caso venha a restar produtos após esses envios, estes, então, são direcionados para as demais categorias. O problema está em não haver padronização do **quanto** enviar, tampouco é levado em consideração o **custo** associado a esses envios. Dessa forma, podemos ter um material sendo enviado para uma região bem distante no lugar de outra que possui um custo logístico menor, apenas para recomposição de estoque nas lojas. Além disso, pode ocorrer de uma dada loja receber toda a sua demanda solicitada, enquanto outras, podem não receber nada.

3.3 Fluxograma do processo

Com base no exposto na seção 3.2, este estudo construiu um fluxograma (Figura 4) para auxiliar o entendimento do problema.

Um dos pressupostos está em que, apesar de existirem 19 lojas vinculadas à Regional, nem sempre todas precisarão de um dado material (produto) ao mesmo tempo. Assim, no momento de decidir a distribuição do material, o modelo proposto deve considerar apenas as unidades que estão solicitando o produto. Isso significa que formalmente a loja deve ter encaminhado um pedido e este estar presente no Relatório de GAPs. Caso o pedido não esteja implantando, ele deverá sê-lo para que o processo de distribuição siga o fluxo desejado.

Comumente, os pedidos são apenas inseridos no sistema de requisições de compras, o que é uma forma das filiais sinalizarem para as usinas uma intenção de compra, ou seja, a previsão de demanda baseada no histórico de vendas. Para que o pedido de fato seja encaminhado é necessário que uma requisição seja convertida em pedido. Trata-se de uma questão burocrática do sistema de faturamento da usina, pois se não houver a conversão da requisição em pedido, o sistema não consegue emitir notas fiscais e faturar o pedido. Dessa forma, só as lojas que estão no GAP e que possuem pedidos implantados tornam-se candidatas a receber os produtos.

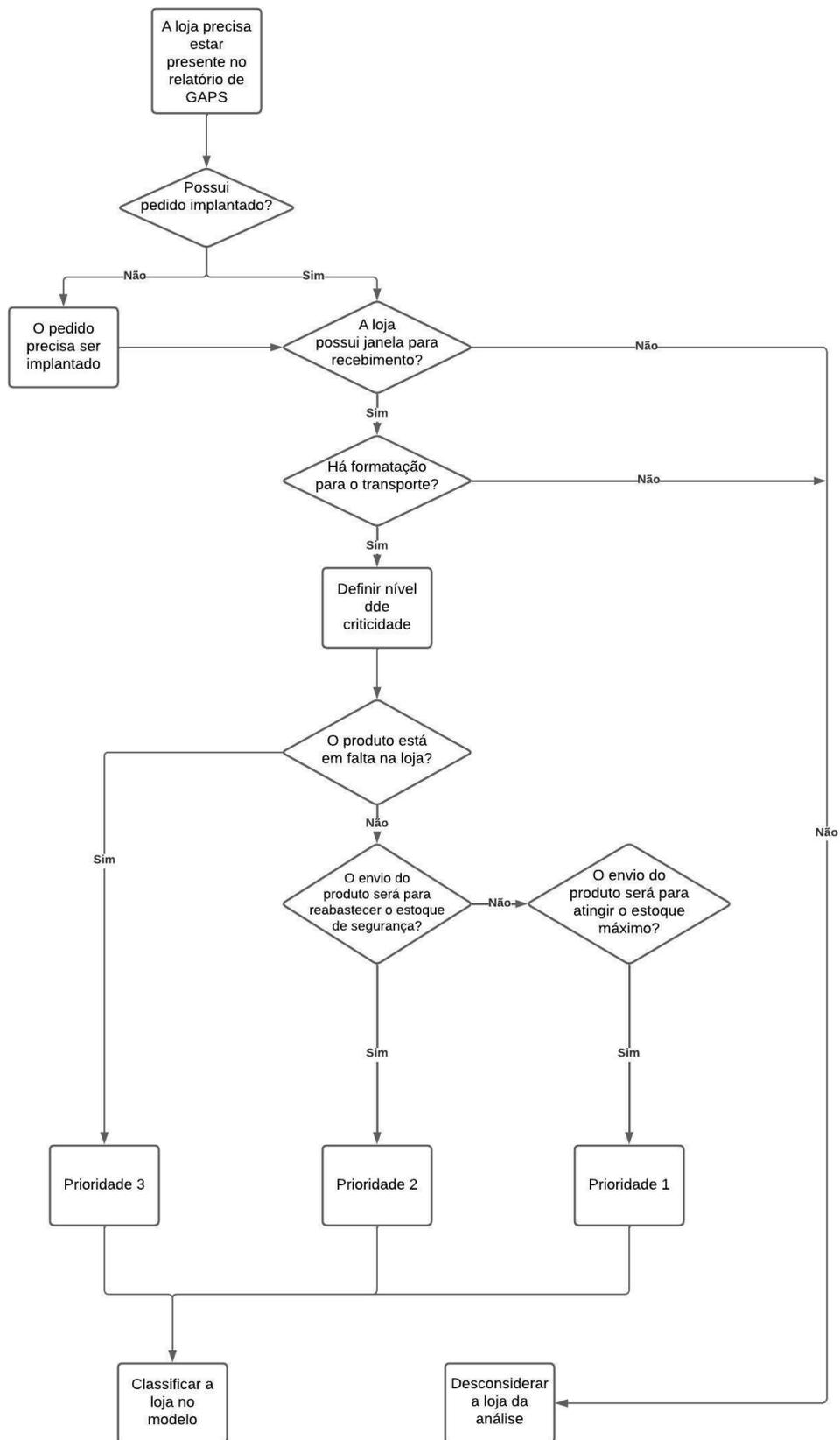
Uma vez identificada a demanda pelo material, é essencial verificar se a loja pode realmente recebê-lo, o que pode ser verificado através da janela de recebimento na unidade de destino, que nada mais é do que o agendamento associado à logística que envolve os veículos. Em alguns casos, devido ao alto fluxo de carga/descarga, podem ser geradas grandes filas de caminhões, o que pode tornar inviável o descarregamento de um novo transporte. Caso essa impossibilidade ocorra, é necessário desconsiderar a demanda da loja, visto que mesmo que o material seja enviado não será incorporado à empresa em tempo hábil. Em outras palavras, devido a essa restrição logística, o material poderia ficar parado numa fila (dentro do transporte) diante de uma loja, enquanto outra, que possui disponibilidade para receber pode não ter sido contemplada com o envio deste produto. Portanto, é crucial considerar apenas unidades que

estejam aptas a receber, para dar celeridade ao fluxo, minimizar os atrasos e a insatisfação de clientes.

Considerando que a loja possui disponibilidade para receber a carga, a próxima etapa seria verificar se existe um veículo disponível para fazer essa rota. Um grande desafio para a área logística da empresa é realizar a formatação adequada de um veículo, ou seja, a disposição física do material dentro do espaço de armazenamento do caminhão. Dificilmente essa carga é enviada com um único tipo de produto, na maioria das vezes o carregamento é realizado considerando um mix de produtos que busca ocupar o espaço de armazenamento em sua totalidade e com isso, reduzir os custos com o frete morto. A capacidade do caminhão *truck* frequentemente utilizado neste processo é de 25 toneladas (25t). A título de exemplificação, há produtos como as telas colunas que ocupam muito espaço (área), mas pesam muito menos que um vergalhão. Por esse motivo, são criadas formatações que reúnem esses dois tipos de materiais, para que o valor do frete pago por tonelada seja melhor aproveitado, visto que uma carga só de telas ocuparia todo o veículo mas não chegaria a sua capacidade máxima de 25t, tornando o custo pago pelo peso que não foi carregado um frete por peso morto. Com isso, é importante verificar se o material demandado pela loja de destino já apresenta uma carga formatável, pois caso não exista, será necessário aguardar uma nova formatação que pode demorar alguns dias, a depender do faturamento de outros materiais presentes no mix considerado pela equipe. Uma vez que isso ocorra é interessante que a demanda dessa loja seja ignorada para seguir com as unidades que cumprem este critério evitando que o material fique parado no estoque.

Após a análise das etapas anteriores, prossegue-se com a identificação das categorias dos GAPs (Falta, E_{min} e $E_{máx}$) e definição de uma prioridade de atendimento. Essa prioridade vai do nível 1 a 3, onde o 3 é o de maior prioridade.

Figura 4. Fluxograma do processo de alocação dos produtos para as lojas



Fonte: Esta pesquisa (2024).

3.4 Modelo Proposto

O modelo considera três fontes de suprimentos responsáveis pela produção de um determinado produto, tendo sua fabricação originada em qualquer uma das três usinas (U_1 , U_2 e U_3) que fazem parte da regional analisada. É sabido a capacidade de produção de cada usina (C_1 , C_2 , C_3 , respectivamente). A capacidade total C_i é dada em toneladas por mês. Dificilmente as três usinas apresentarão a capacidade de produção suficiente para suprir as demandas de todas as lojas solicitantes. O modelo proposto trata de um problema de transporte desbalanceado, visto que a demanda é superior à oferta. As demandas para cada loja L_i são dadas por D_i .

Os custos associados aos fretes (em real por tonelada) foram fornecidos pela equipe de transporte. Este time fica responsável pelo monitoramento de todos os veículos que chegam e saem das usinas.

Para a construção do modelo, tem-se que X_{ij} são as variáveis de decisão, quantidade de itens de cada usina que seguirão para as lojas. Essas variáveis são medidas em toneladas. A Tabela 1 é a matriz de transporte para o problema em foco, onde as unidades de um dado material devem ser distribuídas pela usina $i = 1, 2, 3$ para os destinos $j = 1, 2, 3 \dots 19$ com seus respectivos custos associados ao frete.

Tabela 1. Matriz de transporte

Loja	U_1	U_2	U_3	Demanda
L_1	$250X_{11}$	$41X_{21}$	$41X_{31}$	D_1
L_2	$210X_{12}$	$167X_{22}$	$167X_{32}$	D_2
L_3	$190X_{13}$	$131X_{23}$	$131X_{33}$	D_3
L_4	$136X_{14}$	$200X_{24}$	$200X_{34}$	D_4
L_5	$433X_{15}$	$383X_{25}$	$383X_{35}$	D_5
L_6	$410X_{16}$	$240X_{26}$	$240X_{36}$	D_6
L_7	$196X_{71}$	$315X_{27}$	$315X_{37}$	D_7
L_8	$125X_{18}$	$220X_{28}$	$220X_{38}$	D_8
L_9	$100X_{19}$	$245X_{29}$	$245X_{39}$	D_9
L_{10}	$94X_{1;10}$	$220X_{2;10}$	$220X_{3;10}$	D_{10}
L_{11}	$140X_{1;11}$	$295X_{2;11}$	$295X_{3;11}$	D_{11}
L_{12}	$483X_{1;12}$	$482X_{2;12}$	$482X_{3;12}$	D_{12}
L_{13}	$59X_{1;13}$	$228X_{2;13}$	$228X_{3;13}$	D_{13}
L_{14}	$550X_{1;14}$	$540X_{2;14}$	$540X_{3;14}$	D_{14}
L_{15}	$416X_{1;15}$	$394X_{2;15}$	$394X_{3;15}$	D_{15}
L_{16}	$220X_{1;16}$	$324X_{2;16}$	$324X_{3;16}$	D_{16}

L_{17}	$207X_{1;17}$	$270X_{2;17}$	$270X_{3;17}$	D_{17}
L_{18}	$350X_{1;18}$	$394X_{2;18}$	$394X_{3;18}$	D_{18}
L_{19}	$240X_{1;19}$	$324X_{2;19}$	$324X_{3;19}$	D_{19}
Suprimento	S_1	S_2	S_3	

Fonte: Esta Pesquisa (2024).

A função objetivo deve minimizar os custos com o transporte, tendo um total de 57 variáveis de decisão e considerando restrições referentes a capacidade produtiva, demanda apresentada pelas lojas e múltiplos em que os produtos podem ser vendidos, temos:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & 250X_{11} + 41X_{21} + 41X_{31} + 210X_{12} + 167X_{22} \\ & + 167X_{32} + \dots + 240X_{1;19} + 324X_{2;19} + 324X_{3;19} \end{aligned}$$

Sujeito a

$$\begin{aligned} X_{11} + X_{12} + X_{13} + \dots + X_{1;19} &= S_1 && \text{(Restrição de oferta 1)} \\ X_{21} + X_{22} + X_{23} + \dots + X_{2;19} &= S_2 && \text{(Restrição de oferta 2)} \\ X_{31} + X_{32} + X_{33} + \dots + X_{3;19} &= S_3 && \text{(Restrição de oferta 3)} \\ X_{11} + X_{21} + X_{31} &\leq D_1 && \text{(Restrição de demanda 1)} \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} &\leq D_2 && \text{(Restrição de demanda 2)} \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} &\leq D_3 && \text{(Restrição de demanda 3)} \\ \dots &&& \\ X_{1;19} + X_{2;19} + X_{3;19} &\leq D_{19} && \text{(Restrição de demanda n)} \end{aligned}$$

Uma contribuição deste trabalho ao modelo de transporte é a incorporação de um coeficiente para considerar o grau de prioridade de uma loja comercial. Assim, ao contrário da formulação padrão para o problema de transporte (que assumiria que todas as lojas apresentam a mesma probabilidade de receber a quantidade demandada), este estudo considera que as lojas podem apresentar até três níveis de prioridades diferentes. A esses níveis foram atribuídos valores como forma de categorização, sendo:

- Prioridade 3 a mais alta, para itens classificados como GAP Falta
- Prioridade 2 para o GAP E_{\min}
- Prioridade 1 para o GAP E_{\max}

Com o intuito de adequar o modelo a essa realidade e garantir uma representação mais fiel, definiu-se novas restrições, a saber:

$$\begin{aligned}
X_{11} + X_{21} + X_{31} &\geq k * D_1 \text{ (Restrição de prioridade 1)} \\
X_{21} + X_{22} + X_{23} &\geq k * D_2 \text{ (Restrição de prioridade 2)} \\
X_{31} + X_{32} + X_{33} &\geq k * D_3 \text{ (Restrição de prioridade 3)} \\
&\dots \\
X_{1;19} + X_{2;19} + X_{3;19} &\geq k * D_{19} \text{ (Restrição de prioridade 19)} \\
X_{ij} &\geq 0
\end{aligned}$$

$$0 \leq k \leq 1$$

Sendo k o percentual mínimo de atendimento da demanda da loja em sua respectiva classe de priorização. A Tabela 2 apresenta os valores considerados para este trabalho.

Tabela 2. Classes de priorização

Classificação	Prioridade	Valor k
<i>GAP Falta</i>	3	0,8
<i>GAP Emin</i>	2	0,2
<i>GAP Emax</i>	1	0

Fonte: Esta pesquisa (2024).

Desta forma, ao considerar um valor de k igual a 0,8, entende-se que essa unidade de destino deve receber no mínimo 80% da carga demandada. A que tem prioridade 2 deve receber no mínimo 20% da carga demandada e a que tem prioridade 1 pode não receber nenhuma carga no lote de produção em questão. Para resolução do problema foi utilizado o Solver, uma extensão do Microsoft Excel que oferece recursos de otimização para resolver uma variedade de problemas matemáticos, incluindo problemas de programação linear. Ele pode ser utilizado para encontrar a melhor solução para um conjunto de restrições e objetivos definidos pelo usuário. O método que o Solver utiliza para resolver problemas de programação linear é o Simplex, um algoritmo de otimização desenvolvido por George Dantzig na década de 1940. O Método Simplex inicia com uma solução viável e, em seguida, itera através de um conjunto de passos para melhorar gradualmente a solução até que a solução ótima seja identificada ou até que seja determinado que não há solução viável. Durante cada iteração, o Método Simplex move-se de uma solução para outra

ao longo das arestas do espaço de busca, buscando continuamente melhorar o valor da função objetivo (HILIER; LIEBARMAN; 2006).

3.5 Resumo do capítulo

Neste capítulo apresentou o problema em estudo e a construção do modelo de transporte. No próximo capítulo, serão discutidos alguns cenários com a aplicação do modelo proposto.

4. Resultados

Para avaliar o comportamento do modelo de transporte proposto no Capítulo 3 foram considerados três cenários, mantendo o número máximo de 19 lojas e 3 usinas. O Cenário 1 representa um momento de observação real em que o time de abastecimento precisou lidar. Por sua vez, os Cenários 2 e 3 foram criados para avaliar o comportamento do modelo em condições críticas, isto é, com alta demanda com máxima prioridade e de uma demanda onde todas as lojas estão com prioridade mínima, respectivamente. Os coeficientes de prioridade adotados são os definidos na Tabela 2.

Vale ressaltar que o modelo proposto busca encontrar o menor custo de transporte capaz de atender a maior quantidade de lojas, mesmo podendo não enviar a quantidade total solicitada por uma dada loja. O estudo não considerou outras variáveis decisórias para análise do problema, tais como rentabilidade do material em diferentes regiões, a disponibilidade de veículos para diferentes destinos e as estratégias de negócio que porventura existam.

4.1 Cenário 1: Situação cotidiana, com lojas de diferentes prioridades

Para esse cenário, adotou-se os dados reais de um momento cotidiano de decisão sobre a alocação das cargas para as lojas. A Tabela 3 ilustra o resultado do modelo de transporte proposto.

Neste cenário, as três usinas operam com suas capacidades máximas, tendo apenas 2 lojas apresentando a prioridade 3 (ausência total de peças no estoque da loja de um material já vendido).

Na Tabela 3, nota-se que, além de L2 e L19 que apresentavam a maior prioridade, mais 13 lojas são atendidas, representando um custo de R\$80.276,00. Isto representa 78,94% de lojas atendidas. As quatro lojas que não receberam nenhum material eram todas de prioridade baixa, onde os pedidos eram apenas para atingir o estoque máximo.

Diferente da loja L2 que recebeu toda a demanda solicitada (80 peças), a L19, mesmo tendo prioridade 3 recebeu 80% da demanda solicitada. Isso permitiu atender a um maior número de lojas, o que representa uma vantagem do modelo proposto.

Tabela 3. Dados do cenário 1

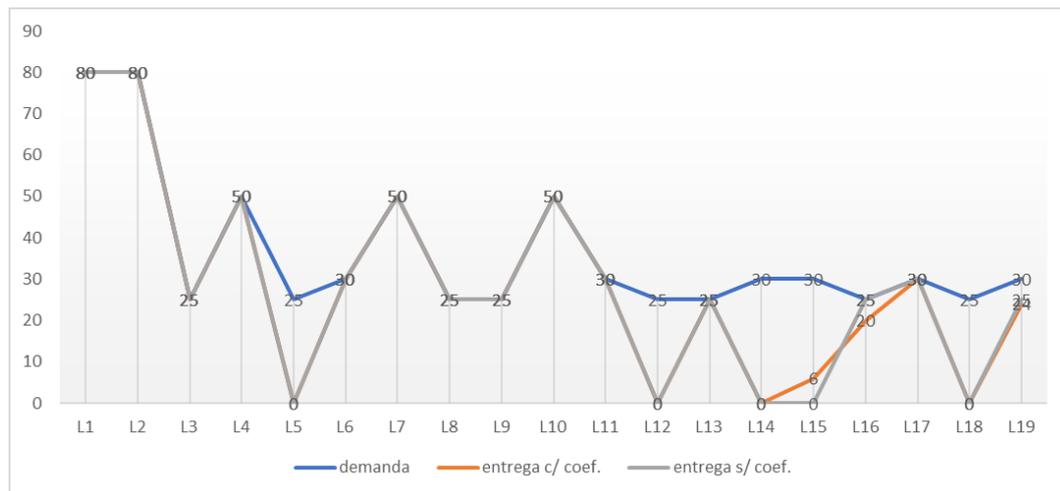
Destinos	Pontos de Origem			Demanda	Prioridade						
	U1	U2	U3			U1	U2	U3	entrega	demanda	
L1	250	41	41	80	1	L1	0	0	80	80	80
L2	210	167	167	80	3	L2	0	80	0	80	80
L3	190	131	131	25	1	L3	0	25	0	25	25
L4	136	200	200	50	1	L4	50	0	0	50	50
L5	433	383	383	25	1	L5	0	0	0	0	25
L6	410	240	240	30	1	L6	0	16	14	30	30
L7	196	315	315	50	1	L7	50	0	0	50	50
L8	125	220	220	25	2	L8	25	0	0	25	25
L9	100	245	245	25	1	L9	25	0	0	25	25
L10	94	220	220	50	1	L10	50	0	0	50	50
L11	140	295	295	30	1	L11	30	0	0	30	30
L12	483	482	482	25	1	L12	0	0	0	0	25
L13	59	228	228	25	2	L13	25	0	0	25	25
L14	550	540	540	30	1	L14	0	0	0	0	30
L15	416	394	394	30	2	L15	0	0	6	6	30
L16	220	324	324	25	1	L16	20	0	0	20	25
L17	207	270	270	30	1	L17	1	29	0	30	30
L18	350	394	394	25	1	L18	0	0	0	0	25
L19	240	324	324	30	3	L19	24	0	0	24	30
Disponível	300	150	100	690		oferta	300	150	100		

Fonte: Esta pesquisa (2024).

Nota-se que as lojas com prioridade 2 receberam pelo menos 20% do pedido, sendo o suficiente para recompor o estoque mínimo e atender de imediato possíveis vendas.

A Figura 5 apresenta um comparativo entre os resultados obtidos pelo modelo através da aplicação do coeficiente de priorização e sem ele. Neste cenário é possível observar que com uso do coeficiente 15 lojas são atendidas, representando 78,94% da rede comercial. Por sua vez, sem a utilização do coeficiente esse atendimento é reduzido em uma loja, passando a atender agora 14 das 19. Um ponto a destacar é que além de aumentar o nível de atendimento de uma loja ao aplicar o coeficiente, essa loja que passa a ser atendida é a L15 (com prioridade 2) e ao reabastecê-la com o estoque de segurança é possível reduzir o risco associado a uma possível falta futura desse material naquela loja.

Figura 5. Comparativo C1 com o coef. de priorização x Ca s/ o coef. (qnt)



Fonte: Esta pesquisa (2024).

Tabela 4. Comparativo C1 percentual de atendimento

	Demanda	Entrega c/ coef.	Entrega s/ coef.	Percentual de atendimento - C1 (c/ coef)	Percentual de atendimento - C1 (s/ coef)
L1	80	80	80	100%	100%
L2	80	80	80	100%	100%
L3	25	25	25	100%	100%
L4	50	50	50	100%	100%
L5	25	0	0	0%	0%
L6	30	30	30	100%	100%
L7	50	50	50	100%	100%
L8	25	25	25	100%	100%
L9	25	25	25	100%	100%
L10	50	50	50	100%	100%
L11	30	30	30	100%	100%
L12	25	0	0	0%	0%
L13	25	25	25	100%	100%
L14	30	0	0	0%	0%
L15	30	6	0	20%	0%
L16	25	20	25	80%	100%
L17	30	30	30	100%	100%
L18	25	0	0	0%	0%
L19	30	24	25	80%	83%

Fonte: Esta pesquisa (2024).

4.2 Cenário 2: Todas as lojas com prioridade máxima

O segundo cenário, por sua vez, desenha um panorama otimista de vendas. Isto é, todas as lojas apresentam prioridade máxima (prioridade 3),

tendo todo o volume demandado por elas, vendido. Esse cenário refletiria uma situação em que o mercado do aço estaria aquecido.

Em contraposição a isso, a logística possui o desafio de atender a maior quantidade de lojas possíveis e um bom nível de serviço para todos os clientes. Os resultados deste cenário estão apresentados na Tabela 5.

Ao analisar este cenário, nota-se um custo de frete significativo de R\$133.124,00, donde todas as 19 lojas foram contempladas, porém nenhuma delas recebeu toda a demanda solicitada. Esse atendimento parcial possibilitou recompor em até 80% dos estoques de todas as lojas do grupo, sendo visto como um cenário bastante produtivo. Em geral, os clientes das lojas são construtoras que possuem cronogramas de obra e que preferem receber parte da carga no menor tempo possível a ter que ficar esperando muito tempo para receber tudo de uma única vez.

Tabela 5. Dados do cenário 2

Destinos	Pontos de Origem			Demanda	Prioridade
	U1	U2	U3		
L1	250	41	41	80	3
L2	210	167	167	80	3
L3	190	131	131	25	3
L4	136	200	200	50	3
L5	433	383	383	25	3
L6	410	240	240	30	3
L7	196	315	315	50	3
L8	125	220	220	25	3
L9	100	245	245	25	3
L10	94	220	220	50	3
L11	140	295	295	30	3
L12	483	482	482	25	3
L13	59	228	228	25	3
L14	550	540	540	30	3
L15	416	394	394	30	3
L16	220	324	324	25	3
L17	207	270	270	30	3
L18	350	394	394	25	3
L19	240	324	324	30	3
Disponível	300	150	100	690	

	U1	U2	U3	entrega	demanda
L1	0	64	0	64	80
L2	64	0	0	64	80
L3	20	0	0	20	25
L4	40	0	0	40	50
L5	20	0	0	20	25
L6	24	0	0	24	30
L7	40	0	0	40	50
L8	20	0	0	20	25
L9	20	0	0	20	25
L10	0	40	0	40	50
L11	0	24	0	24	30
L12	0	0	20	20	25
L13	0	0	20	20	25
L14	0	0	24	24	30
L15	0	12	12	24	30
L16	10	10	0	20	25
L17	24	0	0	24	30
L18	18	0	0	18	25
L19	0	0	24	24	30
oferta	300	150	100		

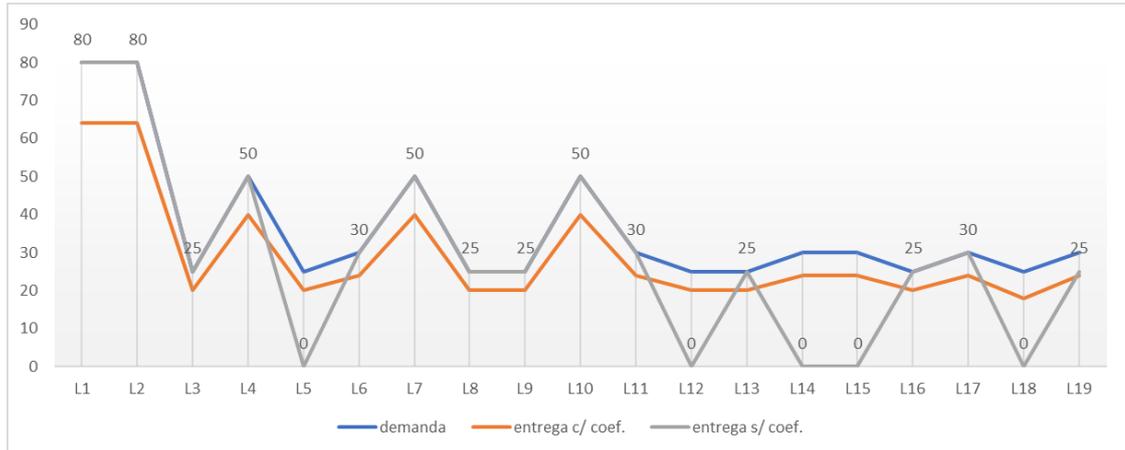
Fonte: Esta pesquisa (2023).

A entrega do produto a um maior número de clientes no menor tempo possível visa reduzir a insatisfação deste pela ausência do material para entrega imediata, a possibilidade de cancelamento de pedidos, bem como a perda em definitivo do cliente para concorrentes.

Como pode ser visualizado na Figura 6 a aplicação do coeficiente resulta em aumento significativo do nível de atendimento, visto que com a utilização dele

100% das lojas passam a ser atendidas em comparação a 73,68% que seriam atendidas sem a utilização dele. Diante de um cenário como este, em que todas as lojas precisam receber o material o mais rápido possível, pois já estão devendo o atendimento ainda que parcial de todas as lojas é visto como positivo pela gestão do abastecimento.

Figura 6. Comparativo C2 com o coef. de priorização x C2 s/ o coef. (qnt)



Fonte: Esta pesquisa (2024).

Tabela 6. Comparativo C2 percentual de entregas

	Demanda	entrega c/ coef.	entrega s/ coef.	Percentual de atendimento - C2 (c/ coef)	Percentual de atendimento - C2 (s/ coef)
L1	80	64	80	80%	100%
L2	80	64	80	80%	100%
L3	25	20	25	80%	100%
L4	50	40	50	80%	100%
L5	25	20	0	80%	0%
L6	30	24	30	80%	100%
L7	50	40	50	80%	100%
L8	25	20	25	80%	100%
L9	25	20	25	80%	100%
L10	50	40	50	80%	100%
L11	30	24	30	80%	100%
L12	25	20	0	80%	0%
L13	25	20	25	80%	100%
L14	30	24	0	80%	0%
L15	30	24	0	80%	0%
L16	25	20	25	80%	100%
L17	30	24	30	80%	100%
L18	25	18	0	72%	0%
L19	30	24	25	80%	83%

Fonte: Esta pesquisa (2024).

4.3 Cenário 3: Todas as lojas com prioridade mínima e layoff de uma das usinas

O terceiro cenário delineia uma conjuntura desafiadora para a produção, onde uma baixa demanda é ocasionada pela importação do produto manufaturado, por exemplo, do aço chinês. Assim sendo, com a entrada de mais produtos no mercado, é esperado que as vendas nas lojas diminuam, sendo os pedidos feitos por elas para as usinas apenas para recomposição do estoque máximo.

Para fins desse trabalho, foi feito um levantamento sobre os históricos de vendas das lojas em 3 meses e quanto elas costumam solicitar para alcançar o estoque máximo. O valor médio foi o adotado como sendo as demandas das lojas.

Considerando então que as lojas teriam uma baixa de faturamento e produtos por mais tempo em estoque, uma solução para equilibrar

financeiramente a cadeia de suprimentos de suprimentos pode ser o *layoff* de uma das usinas. Isto é, o *layoff*, diferentemente do conceito de demissão em massa em outras partes do mundo, no Brasil faz referência a uma suspensão temporária do contrato de trabalho. Caso uma empresa enfrente uma significativa diminuição em suas receitas, essa circunstância inevitavelmente causará um impacto direto no fluxo de caixa. A implementação da prática de *layoff* pode ser uma estratégia eficaz para equilibrar essa equação, especialmente ao reduzir custos de acordo com a perda de receita.

O reflexo dessa tomada de decisão estratégica seria uma restrição adicional na capacidade produtiva, o que reduziria o volume total produzido pela regional. Neste cenário, a todas as lojas envolvidas a prioridade 1 e a usina 3 foi posta em *layoff*. A Tabela 7 apresenta os resultados deste cenário.

Tabela 7. Dados do cenário 3

Destinos	Pontos de Origem			Demanda	Prioridade
	U1	U2	U3		
L1	250	41		80	1
L2	210	167		80	1
L3	190	131		25	1
L4	136	200		50	1
L5	433	383		25	1
L6	410	240		30	1
L7	196	315		50	1
L8	125	220		25	1
L9	100	245		25	1
L10	94	220		50	1
L11	140	295		30	1
L12	483	482		25	1
L13	59	228		25	1
L14	550	540		30	1
L15	416	394		30	1
L16	220	324		25	1
L17	207	270		30	1
L18	350	394		25	1
L19	240	324		30	1
Disponível	300	150	0	690	

	U1	U2	U3	entrega	demanda
L1	0	80	0	80	80
L2	15	45	0	60	80
L3	0	25	0	25	25
L4	50	0	0	50	50
L5	0	0	0	0	25
L6	0	0	0	0	30
L7	50	0	0	50	50
L8	25	0	0	25	25
L9	25	0	0	25	25
L10	50	0	0	50	50
L11	30	0	0	30	30
L12	0	0	0	0	25
L13	25	0	0	25	25
L14	0	0	0	0	30
L15	0	0	0	0	30
L16	0	0	0	0	25
L17	30	0	0	30	30
L18	0	0	0	0	25
L19	0	0	0	0	30
oferta	300	150	0		

Fonte: Esta pesquisa (2024).

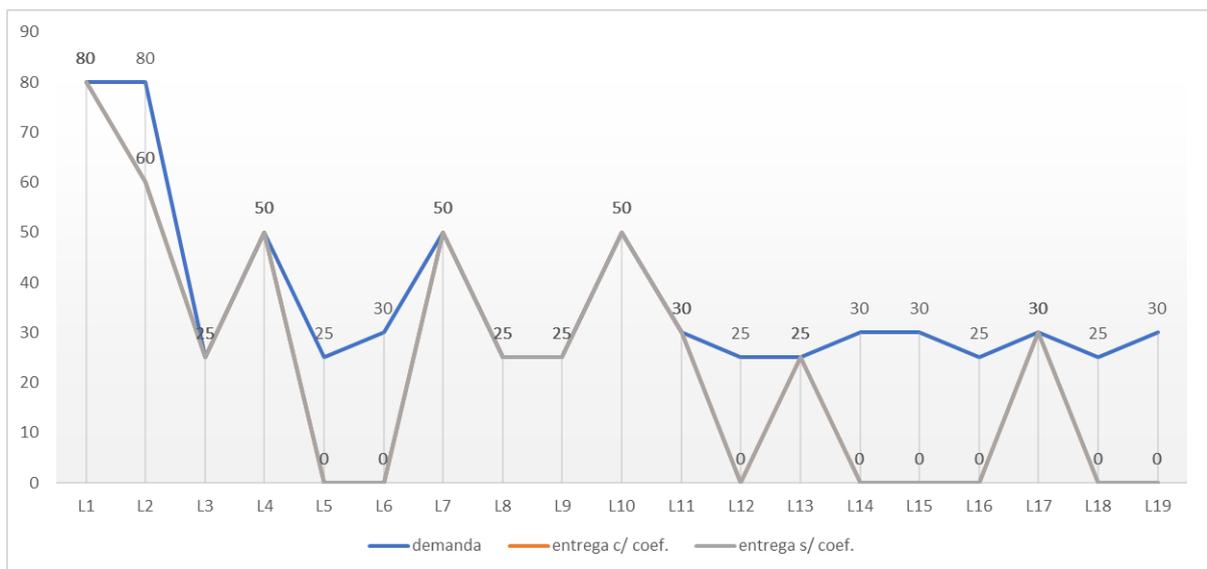
Neste cenário, 11 lojas recebem o material, sendo que 10 delas com a demanda total atendida. Isso representou atender a 57,89% das lojas. O custo total de frete foi de R\$ 56.030,00.

O resultado do modelo fornece um bom direcionamento para o decisor, ainda que 8 lojas tenham ficado sem receber o material. Observa-se que neste cenário nenhuma das lojas têm clientes esperando por uma entrega, então não

havendo prejuízo ao custo de oportunidade, pois não há faltas do mesmo. Dessa forma, encontrar um contexto de produção e de transporte que diminua os custos é o mais adequado.

Por fim, a Figura 7 traz o resultado esperado de que neste cenário, não há variação de resultado com ou sem a aplicação do coeficiente, visto que o percentual mínimo de atendimento para a prioridade mais baixa já é de 0%, o que se assemelha ao modelo inicial, sem o coeficiente de priorização. De toda forma, o modelo cumpre seu papel em minimizar o custo e respeita todas as restrições atribuídas.

Figura 7. Comparativo C3 com o coeficiente de priorização X C3 sem o coeficiente (qtd)



Fonte: Esta pesquisa (2024).

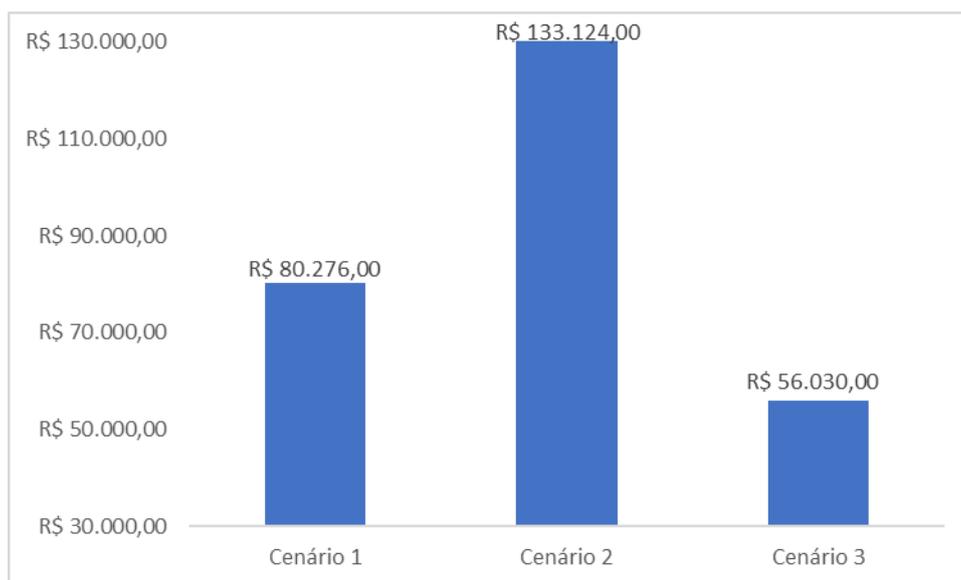
Tabela 8. Comparativo C3 percentual de entregas

	Demanda	Percentual de atendimento - C3
L1	80	100%
L2	80	75%
L3	25	100%
L4	50	100%
L5	25	0%
L6	30	0%
L7	50	100%
L8	25	100%
L9	25	100%
L10	50	100%
L11	30	100%
L12	25	0%
L13	25	100%
L14	30	0%
L15	30	0%
L16	25	0%
L17	30	100%
L18	25	0%
L19	30	0%

Fonte: Esta pesquisa (2024).

A Figura 8 apresenta um resumo dos custos totais de transporte associado a cada um dos cenários descritos.

Figura 8. Relação dos custos em cada cenário com o coef.



Fonte: Esta pesquisa (2024).

Todos os cenários apresentam o menor custo possível dentro do respectivo contexto analisado. A análise comparativa entre o cenário 1 e o cenário 2 revela um crescimento significativo de 66% nos custos de transporte, passando de R\$ 80.276,00 para R\$ 133.124,00. Contudo, no cenário 1 houve o atendimento para 15 lojas, enquanto no segundo cenário, esse número aumentou para 19. Isso implica em contratar um maior número de veículos, contribuindo para o aumento global dos custos devido ao aumento de destinos. Ao comparar o cenário 1 com o cenário 3, observa-se uma redução de 30% nos custos totais de transporte, declinando de R\$ 80.276,00 para R\$ 56.030,00. No entanto, essa redução no custo vem acompanhada de uma diminuição no nível de atendimento (uma usina posta em *layoff*) e apenas 11 lojas foram contempladas no terceiro cenário. O equilíbrio entre custos e cobertura de atendimento torna-se, portanto, um ponto crítico na tomada de decisões estratégicas, onde a otimização dos recursos deve ser cuidadosamente ponderada em relação aos objetivos de alcance.

4.5 Análise de sensibilidade do valor k

Observando o cenário 1 foi possível identificar que das duas lojas que apresentavam a prioridade máxima (L2 e L19), apenas a última não recebeu sua demanda total, ao mesmo tempo em que lojas com prioridades inferiores receberam tudo que demandavam inicialmente. Surge então o questionamento sobre qual deveria ser o valor de k onde a prioridade supera a minimização do custo para o modelo. Diante disso, foi realizada uma variação do k para valores superiores a 0,8 (utilizado nos cenários anteriores), mantendo o valor 0 para as lojas que apresentavam a menor prioridade e variando os demais, adotando sempre um k menor para prioridade 2.

Na Tabela 9 é possível visualizar que a loja L19 só passa a receber sua demanda total a partir do $k = 0,97$, neste ponto temos todas as lojas com prioridade máxima sendo atendida. Percebe-se então, que ainda existem lojas de prioridade 2 que não recebem a demanda completa, enquanto há unidades de prioridade inferior que são 100% atendidas, o que reflete que em detrimento do $k = 0,92$ para prioridade 2, o custo prevalece sobre a prioridade, sendo então o valor 0,97 o limiar para essa situação, visto que na última coluna da figura

quando esse valor é adotado para as duas maiores prioridades, todas as lojas com prioridade 3 e 2 são 100% atendidas. No entanto, ao atribuir o mesmo k para as essas prioridades, traríamos a falsa ideia de que elas apresentariam a mesma importância, o que em outros cenários poderiam resultar no atendimento de uma loja de prioridade 2 em detrimento de outra com prioridade 3.

Tabela 9. Variação dos valores k

Destinos	Demanda	Prioridade	k = 0,95; 0,90; 0	k = 0,96; 0,91; 0	k = 0,97; 0,92; 0	k=0,97;0,93;0	k=0,97;0,97;0
			Perc(%) de atendimento				
L1	80	1	100%	99%	99%	99%	98%
L2	80	3	100%	100%	100%	100%	100%
L3	25	1	100%	100%	100%	100%	100%
L4	50	1	100%	100%	100%	100%	100%
L5	25	1	0%	0%	0%	0%	0%
L6	30	1	100%	100%	100%	100%	100%
L7	50	1	100%	100%	100%	100%	100%
L8	25	2	100%	100%	100%	100%	100%
L9	25	1	100%	100%	100%	100%	100%
L10	50	1	100%	100%	100%	100%	100%
L11	30	1	100%	100%	100%	100%	100%
L12	25	1	0%	0%	0%	0%	0%
L13	25	2	100%	100%	100%	100%	100%
L14	30	1	0%	0%	0%	0%	0%
L15	30	2	90%	93%	93%	93%	100%
L16	25	1	0%	0%	0%	0%	0%
L17	30	1	80%	80%	77%	77%	73%
L18	25	1	0%	0%	0%	0%	0%
L19	30	3	97%	97%	100%	100%	100%

Fonte: Esta pesquisa (2024).

4.6 Discussão sobre os resultados

Neste capítulo, três cenários foram analisados. Cada um apresenta desafios e oportunidades no abastecimento de materiais para as lojas. No primeiro cenário, o modelo propõe uma estratégia de atendimento que prioriza as lojas de maior necessidade, abastecendo parcialmente diversas unidades. Entretanto, algumas lojas, não têm suas demandas totalmente atendidas, exigindo uma avaliação mais aprofundada de seus impactos.

Uma das limitações do modelo para apoiar ainda mais o problema de decisão referente ao abastecimento das lojas é que ele não considera parâmetros como rentabilidade e importância estratégica dos clientes, bem como a disponibilidade e a formatação dos veículos. Todavia, a busca pelo menor custo de transporte é visto como de alta relevância para a gestão e, em sendo

assim, um estudo introdutório sobre o assunto trouxe relevantes percepções sobre o problema com a introdução dos perfis de prioridade.

O segundo cenário, caracterizado por um alto custo de frete, têm-se a recomendação de um atendimento parcial para todas as lojas. Isto é, todas foram atendidas, mas não em sua total solicitação. A aplicação de percentuais mínimos de atendimento é uma estratégia para mitigar impactos decorrentes de atrasos, mas novamente a importância de fatores qualitativos não considerados no modelo deve ser ressaltada.

Os valores adotados na Tabela 2 (Coeficientes de prioridade) foram baseados em discussões informais com o time de abastecimento, não tendo nenhum estudo mais avançado se os mesmos poderiam ser melhorados. Recomenda-se como um trabalho futuro esse estudo.

No terceiro cenário, o modelo sugere uma distribuição que atende a 57% das lojas, e destas, 90% delas têm suas demandas totalmente atendidas, resultando em um custo de frete menor. A análise aponta que 42% de todas as lojas não atendidas não sofrem impactos significativos, pois estão apenas restabelecendo estoques, sem clientes aguardando. Destaca-se a redução de custos como um fator crucial em um mercado em baixa.

O modelo contribui para o suporte à tomada de decisão dado que as sugestões advindas são passíveis de serem colocadas em prática pelo executivo de vendas e operações. Entretanto, é preciso analisar melhor a realidade para que o modelo se aproxime ainda mais dela e, assim retorne um resultado mais adequado à estratégia de negócio. Dentre os pontos destacados pela Gestão de Logística ao ser apresentado os resultados deste estudo e vistos como pontos de melhoria, têm-se:

- A necessidade de buscar mais informações e dados históricos sobre alguns abastecimentos passados que foram considerados estratégicos e vistos como bem-sucedidos, para que possam ser inseridos no modelo. Uma possibilidade seria aumentar o número de níveis de prioridade, distinguindo ainda mais os tipos de clientes;
- Um melhor detalhamento sobre o tipo de veículo e a formatação da carga. Para este estudo foi considerado apenas um único tipo e uma única carga. Como o estudo foi feito para o produto “vergalhão” - onde é comum ele ocupar totalmente a carga - o modelo atendeu a esta realidade. Contudo,

para outros produtos, onde há a necessidade de combinar diferentes itens no mesmo veículo, o modelo requereria alterações. Raramente uma carga é composta por um único tipo de item; pelo contrário, o carregamento é frequentemente planejado de forma a incluir um mix variado de produtos. O objetivo é otimizar o uso do espaço disponível, minimizando os custos associados ao frete ocioso. Sendo assim, fica evidente que há a necessidade de incluir ao modelo variáveis que englobam a formatação do veículo, assim como as combinações de produtos para evitar o frete morto

Através dos resultados demonstrados ao longo do capítulo 4, vemos que o modelo retorna resultados úteis para o contexto e cumprem o propósito matemático da minimização do custo atrelado ao frete, no entanto fica evidente que há fatores não incorporados ao modelo como a rentabilidade do material para diferentes regiões, parcerias de negócios e clientes estratégicos. A título de elucidação, a organização por vezes decide atender regiões mais extremas para estar envolvida em temas de seus interesses. Por exemplo, para uma região do extremo Norte do país admite-se um lucro menor para assegurar a venda de produtos a um de seus principais fornecedores de sucata, em que este também é seu cliente. Diante disso, chega-se à conclusão de que para casos específicos

o custo não é, isoladamente, o fator mais importante para a tomada de decisão, o que demonstra algumas das limitações do modelo.

Pelo exposto, a implementação do modelo proposto neste estudo fornece um ponto de partida, desempenhando um papel na estruturação inicial do processo decisório relacionado ao abastecimento das lojas. Este ponto de partida não apenas oferece uma visão inicial dos desafios e padrões de abastecimento, mas também contribui para um contínuo refinamento e aprimoramento do modelo de transporte. Ao reconhecer as lacunas existentes entre o modelo atual e a realidade operacional, a empresa se posiciona estrategicamente para introduzir ajustes necessários e alcançar um modelo mais alinhado às suas necessidades específicas. Dessa forma, visa uma tomada de decisão mais precisa e eficaz no contexto de distribuição de suas lojas.

4.7 Resumo do capítulo

Neste capítulo apresentou-se os resultados das três simulações efetuadas com a aplicação do modelo de transporte. Identificou-se também limitações e oportunidades de melhoria do presente modelo. No próximo capítulo, será apresentado a conclusão do trabalho.

5. Conclusão

O estudo analisa os desafios de abastecimento enfrentados por uma rede de 19 lojas que recebem metade da produção de uma siderúrgica composta por três usinas. Apesar de possuir uma grande variedade de produtos, a empresa enfrenta dificuldades para equilibrar a produção e distribuição, devido à capacidade produtiva inferior à demanda do mercado em certos cenários. O objetivo deste estudo é propor um modelo de transporte que apoie a distribuição dos produtos de forma a atender ao maior número possível de lojas, reduzindo custos de transporte e considerando a existência de prioridades das lojas para abastecimento. A prioridade mais alta é quando a loja já vendeu o produto, mas não tem em estoque, e a prioridade mais baixa, é quando o pedido feito por uma loja é apenas para recomposição dos seus limites máximos de estoque.

O estudo destaca três cenários logísticos para o abastecimento de lojas, considerando diferentes perspectivas para o mercado. Cada cenário apresenta desafios e oportunidades. O primeiro cenário descreve uma realidade cotidiana, o segundo cenário um caso crítico de abastecimento e o terceiro cenário, um caso de baixa prioridade de abastecimento em função de uma redução na procura pelo produto nas lojas. Em todos os cenários, observou-se que ao introduzir os níveis de prioridade que representam o percentual mínimo de abastecimento de uma loja, uma quantidade maior de lojas pôde ser atendida.

O modelo sugerido nesta pesquisa, apesar de contribuir para a tomada de decisão, ainda precisa se alinhar mais à realidade da empresa, especialmente considerando variáveis não quantitativas. A falta de histórico prejudica a parametrização, limitando a identificação de tendências. O modelo eficiente na minimização de custos de frete carece de inclusão de fatores como rentabilidade do produto para diferentes regiões do país e questões qualitativas associadas à estratégia global do negócio, evidenciando suas limitações. O desafio logístico envolve também a formatação adequada dos veículos para otimizar o transporte, já que na prática, é improvável que um caminhão saia completamente carregado com apenas um tipo de material, uma vez que são realizadas formatações visando minimizar o frete morto.

Como sugestões para melhoria do modelo em trabalhos futuros, pode-se incluir outras variáveis que incorporem a disponibilidade de veículo e a sua

formatação, bem como uma melhor avaliação sobre os valores adotados para os perfis de prioridade.

Referências

- ACUNA, M. Timber and Biomass Transport Optimization: A Review of Planning Issues, Solution Techniques and Decision Support Tools. **Croatian Journal of Forest Engineering**, v. 38, n. 2, p. 279-290, 2017.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier; 2011.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier; 2015.
- BARGOS, F.F.; LAMAS, W.Q.; BARGOS, D.C.; NETO, M.B.; PARDAL, P.C.P. Location problem method applied to sugar and ethanol mills location optimization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 274, 2020. DOI 10.1016/j.rser.2016.06.079.
- BELMAR-PAREDES, G.; MONTERO, E.; LEONARDINI, O. A milk transportation problem with milk collection centers and Vehicle routing. **ISA Transactions**, v.122, p. 294- 311, 2022. DOI 10.1016/j.isatra.2021.04.020.
- BERTO, R.; NAKATO, D. Revisitando a produção científica nos anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Produção**, v. 24, n. 1, p. 225- 232, 2014. DOI 10.1590/S0103-65132013005000007.
- CAUCHICK, P.A. (org.). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier; ABEPRO, 2012.
- DANTZIG, G. B. Maximization of a linear function of variables subject to linear inequalities. **Activity Analysis of Production and Allocation**, v. 13, p. 339–347, 1947.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H.P.L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.
- HITCKCOCK, F.L. The distribution of a product from several sources to numerous localities. Journal of Mathematical Physics. **Journal of Mathematics and Physics**, v. 20, p. 224–230, 1941.
- HILIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8 ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **Indicadores de mercado: estatísticas de desempenho. 2022.** Disponível em: < <https://acobrasil.org.br/site/sobre-o-nstituto/>>. Acesso em: 20 jul. 2023.

KOOPMANS, T.C. Optimum utilization of the transportation system. **Econometrica**, v. 17, p. 136-146, 1949. DOI 10.2307/1907301 1949.

LACHTERMARCHER, G. **Pesquisa Operacional na tomada de decisões.** 4 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

LEONARD, B.D. A dual methodology for case studies: Synergistic use of a longitudinal single site with replicated multiple sites. **Organization Science**, v. 1, n. 3, p. 248-266, 1990.

LI, F.; JIN, C.; WANG, L. Quasi-linear stochastic programming model based on expectation and variance and its application in transportation problem. **Applied Mathematical Modelling**, v. 38, n. 7-8, p. 1919-1928, 2014. DOI 10.1016/j.apm.2013.10.024

SKRINJAR, J. P., ROGIC, K., STANKOVIC, R. Location of Urban Logistic Terminals as Hub Location Problem. **Transport Logistic Review**, v. 24, n. 5, p. 433-440, 2012.