

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

MARCELO GARBELOTTO RODEGHER

**RESOLUÇÃO DE PROBLEMA LOGÍSTICO DE LOCALIZAÇÃO, ALOCAÇÃO E
ROTEIRIZAÇÃO EM EMPRESA DE COMÉRCIO VAREJISTA ELETRÔNICO**

SÃO PAULO

2019

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

MARCELO GARBELOTTO RODEGHER

**RESOLUÇÃO DE PROBLEMA LOGÍSTICO DE LOCALIZAÇÃO, ALOCAÇÃO E
ROTEIRIZAÇÃO EM EMPRESA DE COMÉRCIO VAREJISTA ELETRÔNICO**

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do diploma de Engenheiro de
Produção

SÃO PAULO

2019

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

MARCELO GARBELOTTO RODEGHER

RESOLUÇÃO DE PROBLEMA LOGÍSTICO DE LOCALIZAÇÃO, ALOCAÇÃO E ROTEIRIZAÇÃO EM EMPRESA DE COMÉRCIO VAREJISTA ELETRÔNICO

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do diploma de Engenheiro de
Produção

Orientador: Prof^a. Dra. Débora Pretti Ronconi

SÃO PAULO

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Rodegher, Marcelo Garbelotto

RESOLUÇÃO DE PROBLEMA LOGÍSTICO DE LOCALIZAÇÃO, ALOCAÇÃO
E ROTEIRIZAÇÃO EM EMPRESA DE COMÉRCIO VAREJISTA ELETRÔNICO /
M. G. Rodegher -- São Paulo, 2019.

122 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.Pesquisa Operacional 2.Logistics 3.Localização 4.Roteirização
5.Heurística I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia de Produção II.t.

AGRADECIMENTOS

À professora Débora Pretti Ronconi, não somente pelo incentivo contínuo e pela mentoria durante a orientação deste trabalho, mas também pela dedicação que sempre teve aos alunos como professora na disciplina de Pesquisa Operacional da Escola Politécnica.

À B2W, pelo suporte e pela disponibilidade para trocar informações e discutir em um processo iterativo, sem o qual o trabalho não seria possível.

À minha família, pelo amor e suporte que sempre me proporcionaram, que me possibilitaram conquistar esta graduação e me tornar o homem que sou hoje.

À Ana Kalaf, por todo o amor, parceria, aprendizado e suporte em cada momento dessa jornada juntos, inclusive os mais difíceis.

Aos meus amigos da Poli, com quem tive o prazer de fazer trabalhos, virar noites e me divertir. Levarei muitos para a vida.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram em qualquer circunstância.

*“O trabalho dignifica o homem, o prazer aperfeiçoa a obra,
a paixão dá sentido e o amor eterniza.”*

David Carvalheira

RESUMO

Este trabalho teve como objeto de estudo a cadeia logística de uma empresa brasileira de comércio eletrônico de bens de consumo. O objetivo foi encontrar uma configuração de máxima eficiência operacional, minimizando gastos com distribuição ao longo do tempo. Como ponto de partida, avaliou-se a utilização dos estoques das lojas da companhia controladora como depósitos intermediários para a cadeia da empresa estudada. A iniciativa faz parte de um projeto que estuda beneficiar-se de maior integração da logística de ambas. O caráter resultante da ideia é uma problemática mista de localização de depósitos, alocação de clientes e roteirização de veículos para o abastecimento dos depósitos. Com abordagem de Pesquisa Operacional, foi utilizada modelagem matemática de Programação Linear Inteira Mista. Dada a caracterização do problema como *NP-hard*, que impossibilita a resolução exata do modelo via *software* em tempo razoável, utilizou-se de uma heurística construtiva. O método iterativo trata-se de uma solução mais prática para o caso enfrentado. Por fim, a solução resulta em uma recomendação de boa qualidade, com a adaptação de múltiplas lojas como depósitos e economia relevante para a empresa.

Palavras Chave: Pesquisa Operacional. Logística. Localização. Roteirização. Heurística.

ABSTRACT

This work studied the logistics of a major e-commerce Brazilian company selling consumer goods. The goal was to find a configuration for maximum operational efficiency, minimizing distribution costs over the time. The starting point for the analyses was the possibility of using the controller company's stores warehouses as intermediary depots for the supply chain. The initiative is part of an ongoing project, which evaluates benefiting from a deeper integration of the logistics chain of both companies. The resulting characteristic is a mixed problem of depots location, client allocation and vehicles routing for depots supply. With the use of Operations Research methods, a mixed linear integer program was developed. Given the NP-hard character of the problem, which makes it unlikely to solve the problem optimally in a reasonable time interval, a constructive heuristics was developed. The method is a more practical approach to the problem. In the end, the resolution results in a good quality recommendation, with the adaptation of multiple stores as depots and relevant savings for the company.

Keywords: Operations Research. Logistics. Location. Routing. Heuristics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vendas totais do <i>e-commerce</i> no Brasil	17
Figura 2 - Cadeia de valor no varejo.....	18
Figura 3 - Transformação dos canais do varejo	19
Figura 4 - Estrutura de marcas e subsidiárias da B2W.	21
Figura 5 - Comparação da variação acumulada do PIB das 4 maiores crises brasileiras da história.....	24
Figura 6 - Variação no volume de vendas no varejo, acumulado de 12 Meses	25
Figura 7 – Fechamento mensal do valor da ação da B2W (BTOW3) na B3, de outubro de 2011 a outubro de 2019.....	25
Figura 8 - Participação do <i>Marketplace</i> e custos logísticos da Amazon	28
Figura 9 - Esquema representativo do escopo do problema logístico.....	30
Figura 10 - Ilustração do modelo logístico atual e do proposto.....	30
Figura 11 - Nível gerencial de algumas decisões de roteirização e localização	35
Figura 12 - Interdependência entre decisão de localização, alocação e roteamento.....	37
Figura 13 - Classificação dos procedimentos aproximativos.....	44
Figura 14 - Ilustração da conservação de fluxos para um dado nó f.....	57
Figura 15 - Exemplos de rotas com e sem subtours.....	58
Figura 16 - Exemplo de rota sem passagem pelo HUB, e de uma rota correta	59
Figura 17 - Exemplo de alocação fracionada e alocação única de Pontos de Entrega	60
Figura 18 - Distribuição geográfica dos elementos do problema fictício	63
Figura 19 - Roteirização e alocação resultantes na solução do problema fictício	67

Figura 20 - Ilustração de caso de ajuste no cálculo da centralidade.....	75
Figura 21 - Formulação da heurística para primeira alocação factível de Pontos de Entrega..	76
Figura 22 - Formulação da heurística de abertura de COs	78
Figura 23 - Formulação da heurística de alocação definitiva dos Pontos de Entrega	79
Figura 24 - Formulação da heurística de roteirização de COs	81
Figura 25 - Processo geral das heurísticas apresentadas	82
Figura 26 - Formulação conceitual completa da Heurística 1	84
Figura 27 - Formulação conceitual completa da Heurística 2	85
Figura 28 - Análise de sensibilidade de aumento da demanda com incrementos de 5%	96
Figura 29 - Análise de sensibilidade de aumento de demanda com incrementos de 5% e cenário de 25% de aumento de capacidade para os COs	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicadores de vendas da B2W	21
Tabela 2 - Logos das marcas de <i>e-commerce</i> da B2W	22
Tabela 3 - Classificação taxonômica de problemas mistos de localização e roteirização	36
Tabela 4 - Classificação dos métodos de resolução para o problema misto de localização e roteirização, segundo Min; Jayaraman e Srivastava (1998)	38
Tabela 5 - Etapas da metodologia proposta	45
Tabela 6 - Estrutura de dados disponibilizados pela empresa	49
Tabela 7 - Distâncias entre HUB e Centros Operacionais	63
Tabela 8 - Custos e capacidade dos tipos de veículos.....	64
Tabela 9 - Restrições e custos dos Centros Operacionais	64
Tabela 10 - Custos de alocação dos Pontos de Entrega aos Centros Operacionais	64
Tabela 11 - Demanda volumétrica e em remessas dos Pontos de Entrega	65
Tabela 12 - Valores positivos resultantes na variável x_{ijrv} , em relação ao número de rota r , tipo de veículo v , nó de origem i e nó de destino j	66
Tabela 13 - Valores resultantes na variável z_{ip} , em relação ao Centro Operacional i e Ponto de Entrega e	66
Tabela 14 - Valores resultantes na variável e	67
Tabela 15 - Custos totais encontrados pela solução ótima.....	68
Tabela 16 - Resultados dos testes computacionais da modelagem do problema, com a utilização de dados reais	70
Tabela 17 – Recorte e análise dos resultados dos testes computacionais	71
Tabela 18 - Validação e análise de resultados das heurísticas propostas.....	86

Tabela 19- Comparação de custos logísticos da solução com a simulação com instâncias baseadas na configuração real	89
Tabela 20 – Alocação de Pontos de Entrega aos COs ativos na solução recomendada (tabela completa disponível no APÊNDICE D).....	90
Tabela 21 - Demandas atendidas por cada rota criada pela solução recomendada	92
Tabela 22 - Rotas e respectivos veículos na configuração recomendada.....	92
Tabela 23 - Rotas e respectivos veículos baseados na solução utilizada pela empresa	93
Tabela 24 - Tipo dos Centros Operacionais abertos.....	93
Tabela 25 - Resultados da análise de sensibilidade	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LASA – Lojas Americanas

PLIM – Programação Linear Inteira Mista

CO – Centro Operacional

PE – Ponto de Entrega

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
2.	CONTEXTO DA EMPRESA	17
2.1.	O mercado de <i>e-commerce</i>	17
2.2.	A B2W Companhia Digital	20
2.3.	Motivação para a otimização da cadeia logística	24
3.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	29
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	34
4.1.	Problemas de localização e roteirização	34
4.2.	Modelagem de problemas similares	38
4.3.	Metodologias heurísticas para problemas similares	42
5.	METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO	45
6.	LEVANTAMENTO DE DADOS	48
7.	MODELAGEM DO PROBLEMA	51
7.1.	Introdução ao modelo	51
7.1.1.	Elementos do problema.....	51
7.1.2.	Problema de roteirização.....	52
7.1.3.	Problema de localização e alocação.....	52
7.2.	Formulação do modelo	53
7.3.	Detalhamento do modelo	56
7.4.	Validação do modelo em problema reduzido	62

7.4.1.	Descrição do problema fictício.....	62
7.4.2.	Solução do problema fictício.....	65
8.	RESOLUÇÃO DO PROBLEMA.....	69
8.1.	Resolução Exata do Problema.....	69
8.2.	Formulação da Heurística Construtiva.....	72
8.2.1.	Problema de Localização.....	73
8.2.2.	Problema de Alocação.....	79
8.2.3.	Problema de Roteirização.....	80
8.3.	Validação das heurísticas	86
9.	ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS.....	88
9.1.	Implementação da heurística.....	88
9.2.	Solução recomendada.....	89
9.3.	Análise de sensibilidade	94
10.	CONCLUSÃO	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	APÊNDICE A - RESULTADOS DAS VARIÁVEIS DE DECISÃO NO TESTE COM PROBLEMA FICTÍCIO	104
	APÊNDICE B - CÓDIGO DA MODELAGEM EM CPLEX OPL	105
	APÊNDICE C - CÓDIGO DAS HEURÍSTICAS EM PYTHON.....	108
	APÊNDICE D - ALOCAÇÃO COMPLETA NA SOLUÇÃO RECOMENDADA.....	118
	APÊNDICE E - AMOSTRA DOS DADOS REAIS UTILIZADOS PARA A RESOLUÇÃO	122

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho, é estudado um problema de otimização de custos logísticos para uma empresa brasileira de comércio eletrônico e distribuição de bens de consumo: B2W Companhia Digital. A companhia possui 4 *websites* através dos quais vende produtos variados e oferece serviços complementares, além de efetuar toda a distribuição do fornecedor até o cliente final.

O trabalho foi realizado em parceria com a área de logística da empresa, com a qual o autor teve contato ao longo do desenvolvimento do estudo, e obteve as informações e dados para o desenvolvimento da resolução do problema.

A B2W trata-se de uma das maiores varejistas de bens de consumo do país, com GMV (*Gross Merchandise Volume*) de R\$15 bilhões no ano de 2018. Somente a plataforma *online Marketplace* que oferece produtos do estoque de terceiros em seu site, cresceu em 2018 para R\$ 7,7 bilhões, um crescimento de 71% em comparação a 2017. Dessa forma, a empresa, que mergulhou em uma situação financeira negativa graças à recente recessão econômica de 2014, vem melhorando seus resultados, atingindo apenas no ano de 2019 uma valorização de 26% em sua ação na bolsa de valores de São Paulo.

Como parte dos esforços em melhorar o atendimento aos clientes e otimizar custos, a empresa possui projetos em desenvolvimento na área logística. A criação da LET'S, plataforma de gestão compartilhada dos ativos de logística da LASA (Lojas Americanas) e B2W, vem revolucionando a cadeia de distribuição atual.

O tema deste trabalho surgiu de uma das iniciativas da plataforma LET's, que tem como princípio a utilização das lojas físicas da LASA como candidatos para depósitos operacionais das entregas *Last Mile*, ou seja, do último trajeto percorrido até o cliente final. O objetivo do estudo é otimizar custos totais com transporte e manutenção de estrutura logística.

Esta mudança tem grande potencial de impacto na configuração atual da cadeia de distribuição, justificando a necessidade de um estudo mais profundo. Para validar a transformação, deve-se levar em conta as implicações da ativação dos novos depósitos tanto para o atendimento do cliente final, quanto para a execução das rotas que o abastecem.

Em consequência da complexidade do estudo, do número de alternativas possíveis e especificidades do problema, torna-se adequada a utilização de técnicas de pesquisa operacional para encontrar uma solução de qualidade.

O problema resultante é composto pela localização de depósitos, alocação de clientes e roteirização de veículos, uma composição de problemas de difícil operacionalização. Propõe-se, portanto, uma busca por uma metodologia que permita unir praticidade de implementação e obtenção de bons resultados.

Este trabalho é organizado em 10 capítulos, que serão sucintamente descritos a seguir.

O Capítulo 1 trata-se de uma breve introdução ao contexto do problema e sua proposta de desenvolvimento.

Os Capítulos 2 e 3 abordam o contexto estratégico e operacional da B2W, caracterizando e definindo o escopo do projeto.

Capítulo 4 propõe-se a reunir uma revisão da literatura existente sobre o tipo de problema e métodos de solução já estudados.

No Capítulo 5, é apresentada a metodologia conceitual, base para a resolução de um problema de pesquisa operacional.

No Capítulo 6, é apresentado o método de levantamento e as características dos principais dados levantados juntamente à empresa como base para o problema.

O Capítulo 7 se dedica à construção do modelo matemático que representa a realidade do problema, apresentando seu funcionamento via aplicação de *software* com problema fictício.

No Capítulo 8, realizam-se testes de performance computacional da resolução exata. Em seguida, é desenvolvida e feita a validação de metodologias heurísticas.

No Capítulo 9, apresenta-se a solução obtida com a implementação da metodologia de resolução definida, e são realizadas análises de sensibilidade do problema.

No Capítulo 10, por fim, o trabalho é encerrado com as conclusões, recomendações e próximos passos sugeridos para a empresa.

2. CONTEXTO DA EMPRESA

Este Capítulo apresenta o setor de varejo eletrônico, a B2W e os principais dados de sua operação. Em seguida, é realizado um aprofundamento sobre as motivações estratégicas para o estudo de otimização logística em questão.

2.1. O mercado de *e-commerce*

Segundo o site Investopedia (2019), o *e-commerce* é um modelo de negócio de comércio baseado na utilização de canais de venda viabilizado pela Internet. As transações podem ser conduzidas através de computadores, *tablets* ou celulares, e concretizadas pela obtenção de um produto ou serviço.

O mercado Brasileiro de *e-commerce* é responsável por R\$ 53 bilhões no total de vendas, e vem crescendo consistentemente nos últimos anos, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Vendas totais do *e-commerce* no Brasil



Fonte: Elaborado com dados do Webshoppers (E-BIT, 2019)

Apesar disto, a penetração das vendas *online* era de apenas 3% do total de vendas do varejo em 2017 (VAREJO, 2019). Isto significa um grande potencial de crescimento ainda inexplorado no setor, que cresce sua participação no total a cada ano. O fato é reforçado pela B2W, com outro dado que mostra este potencial: a penetração da internet do Brasil era de 52% de usuários, contra 90% nos Estados Unidos.

Para entender como funciona o negócio profundamente, é essencial entender a cadeia de valor no varejo. Conforme descrito pela revista Mundo Logística (2015, ed. 48), a cadeia de valor do varejo pode ser visualizada na Figura 2. De modo geral, a cadeia funciona da seguinte maneira:

- O varejista compra o produto do fornecedor;
- Ocorre a operação logística interna, para levar o produto ao centro de distribuição;
- O produto é armazenado e transportado entre centros de distribuição;
- O produto é então transportado até o destino final, onde fica exposto na loja física; no caso do *e-commerce*, o destino final é o cliente.

Figura 2 - Cadeia de valor no varejo



Fonte: Revista Mundo Logística (2015)

O varejo sem loja nasceu das vendas por catálogo, se tornando *e-commerce* quando a internet passou a habilitar o comércio. Em seguida ao varejo *online*, começou a surgir o varejo multicanal, que trata-se da experiência de varejo onde o consumidor compra, consulta informações e visualiza os produtos em ambos os canais *online* e físico. Segundo a revista, conforme essa transformação ocorre, a logística toma um papel fundamental para a cadeia de valor do varejo. Ao mesmo tempo, as empresas sem uma distribuição robusta não obtiveram sucesso no mundo do Multicanal. A transformação de canais pode ser visualizada na Figura 3.

Figura 3 - Transformação dos canais do varejo



Fonte: Revista Mundo Logística (2015, ed. 48)

Outro conceito importante é o segmento de mercado de atuação, em termos de público-alvo do lado comprador e atuante do lado vendedor. Dentre os segmentos existentes, destacam-se 4 mais comuns:

- *Business to Business (B2B)*, ou seja, entre empresas;
- *Business to Consumer (B2C)*, quando o negócio ocorre entre uma empresa, do lado vendedor, para um consumidor, do lado comprador;
- *Consumer to Consumer (C2C)*, quando o negócio ocorre entre consumidores;
- *Consumer to Business (C2B)*, quando o negócio ocorre entre um consumidor, do lado vendedor, e uma empresa, do lado comprador.

O varejo é, por definição, quando o público-alvo se trata de consumidores, ou seja, quando o “C” está do lado comprador.

O negócio da B2W, bem como de outros varejistas tradicionais, se baseia na venda de bens de consumo no segmento B2C. Neste mercado, atua lado a lado a grandes concorrentes, como Magazine Luiza e Via Varejo, localmente, e a Amazon e o grupo Alibaba, como grandes expoentes internacionais e possíveis ameaças futuras.

Outro modelo de comercialização relevante é o C2C, segmento de mercado explorado por grandes competidores como Mercado Livre, de forte presença na América Latina, e o Ebay, de presença internacional. A exploração desse segmento pelos incumbentes é uma ameaça para o mercado da B2W, pois ambos disputam pelos mesmos consumidores. Seu modelo de atuação, no entanto, é diferente do varejo tradicional. O negócio nasceu baseado na manutenção de uma plataforma que facilita a celebração do comércio entre consumidores. No caso dessas empresas,

o escopo de vendedores iniciou a reunião de pequenos e médios negócios, saindo da definição do campo C2C.

Este conceito de negócio se tornou o que é hoje chamado de Marketplace. Trata-se de uma prática em acelerada expansão no mercado mundial, com a adoção de praticamente todos os grandes competidores do *e-commerce*.

Segundo matéria da Forbes (2017), um *Marketplace online* trata-se de um aplicativo ou plataforma digital que facilita a compra de bens de consumo de várias diferentes fontes. O produto vendido através de um *Marketplace*, desta forma, não é originado do estoque do operador da plataforma, mas sim de um terceiro que pagou para anunciar e vender o produto através da plataforma.

As empresas de comércio eletrônico vêm crescendo a participação do *Marketplace* em seu portfólio de produtos, e muitas têm adotado explicitamente a estratégia combinada com ambas as modalidades de vendas próprias e de terceiros.

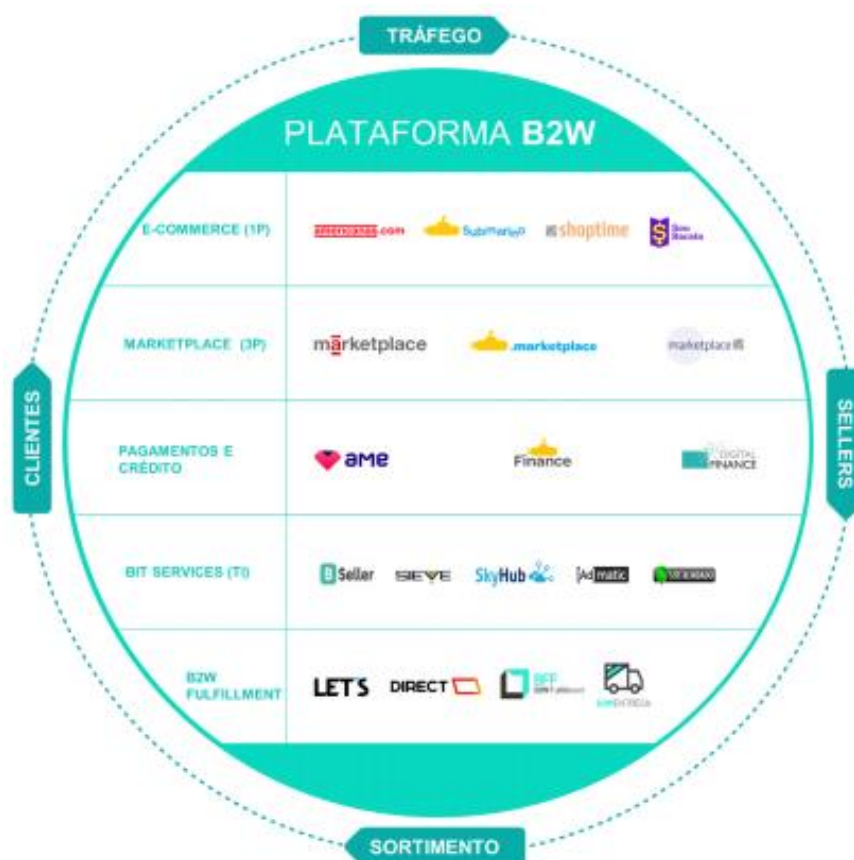
A estratégia de atuação híbrida é a abordagem atual da B2W. Entre os benefícios de ser um operador estão um maior sortimento de produtos e elevado crescimento de vendas. Para os *sellers*, como são chamados os terceiros anunciantes pela B2W, os principais benefícios são a visibilidade em *websites* de grande fluxo de usuários, além de acesso às plataformas complementares de tecnologia, logística, distribuição e atendimento ao cliente que a empresa realiza (B2W, 2016).

2.2. A B2W Companhia Digital

A B2W Companhia Digital é uma empresa resultante da fusão entre a Americanas.com S.A. e a Submarino S.A., e é controlada pela Lojas Americanas S.A., comumente abreviada por LASA. A companhia possui sede no Rio de Janeiro, e tem ações negociadas na bolsa de valores de São Paulo, no segmento Novo Mercado da B3 sob o código BTOW3.

A B2W e suas subsidiárias e controladas atuam nas frentes: *e-commerce*, por meio das marcas Americanas.com, Submarino, Shoptime e Sou Barato; administração e promoção de cartão de crédito; plataforma de tecnologia; plataforma de logística; distribuição e atendimento ao cliente; *Marketplace*; e conta de pagamento digital. Sendo assim, a empresa construiu uma estrutura de negócios complementares bastante ampla, que pode ser visualizada na Figura 4.

Figura 4 - Estrutura de marcas e subsidiárias da B2W.



Fonte: Divulgação de resultados do segundo trimestre de 2019 (B2W, 2019a)

Para compreender a situação atual de qualquer empresa, é essencial observar seus indicadores financeiros. Alguns dos dados relativos às vendas da empresa são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Indicadores de vendas da B2W

Indicador	2017	2018	Variação
GMV Total (R\$ B)	11,8	15,0	26,8%
Marketplace (R\$ B)	4,5	7,7	70,7%
Marketplace (% GMV)	38,3%	51,6%	+13,3p.p.
Receita bruta (R\$ B)	7,8	8,0	3,6%

Fonte: Elaborado com dados do relatório anual de 2018 (B2W, 2019b)

A maior parte deste resultado positivo foi proveniente do *Marketplace*, que obteve 71% de incremento em suas receitas em relação ao ano anterior. Segundo a B2W, este dado é reflexo da estratégia de migração da empresa para um modelo híbrido de *e-commerce* próprio e *Marketplace*. A estratégia vem sendo executada com sucesso, uma vez que o *Marketplace* representa, hoje, 52% das vendas totais da empresa.

Na operação de varejo *online*, a B2W atua com 4 diferentes marcas em seus respectivos sites, como visualizado na Tabela 2. A estratégia por trás da manutenção de 4 plataformas distintas é manter uma diversificação de portfólio para capturar consumidores de diferentes perfis:

- **Americanas.com:** é a maior loja *online* brasileira, com mais de 2,5 milhões de itens disponíveis em mais de 40 categorias. Segundo a B2W, trata-se de uma marca mais democrática e presente no dia a dia de uma variada gama de brasileiros, focando;
- **Submarino.com** é uma marca 100% digital que tem como público alvo a geração Y/Z, buscando promover em seu site uma experiência diferenciada e trazer um portfólio composto pelas últimas tendências nas áreas de tecnologia, entretenimento, cultura e inovação;
- **Shoptime.com** é o maior canal de home shopping da América Latina, com foco em bens mais duráveis e marcas próprias em cama & mesa & banho, eletroportáteis, utilidades domésticas e esporte & lazer. O site é especializado na demonstração de produtos ao vivo, estando no ar 24 horas por dia;
- O “Sou Barato” é a marca responsável pelo site outlet da americanas.com, com descontos de até 70% em produtos reembalados e usados. Para garantir a qualidade, os produtos passam por rigorosa triagem e assistência técnica e são vendidos com garantia.

Tabela 2 - Logos das marcas de *e-commerce* da B2W

Americanas.com 
Submarino.com



Fonte: Site de Relações com Investidores da B2W (B2W,2019c)

Além do e-commerce puro, a empresa tem outros braços de atuação. Segundo declarações da própria empresa, nos últimos anos, foram dispendidos substanciais recursos na integração das plataformas de negócio e na criação de sólida infraestrutura operacional, permitindo hoje uma operação multicanal, multinegócios e multimarcas, obtendo com isto relevantes ganhos de escala e sinergias (B2W, 2019d).

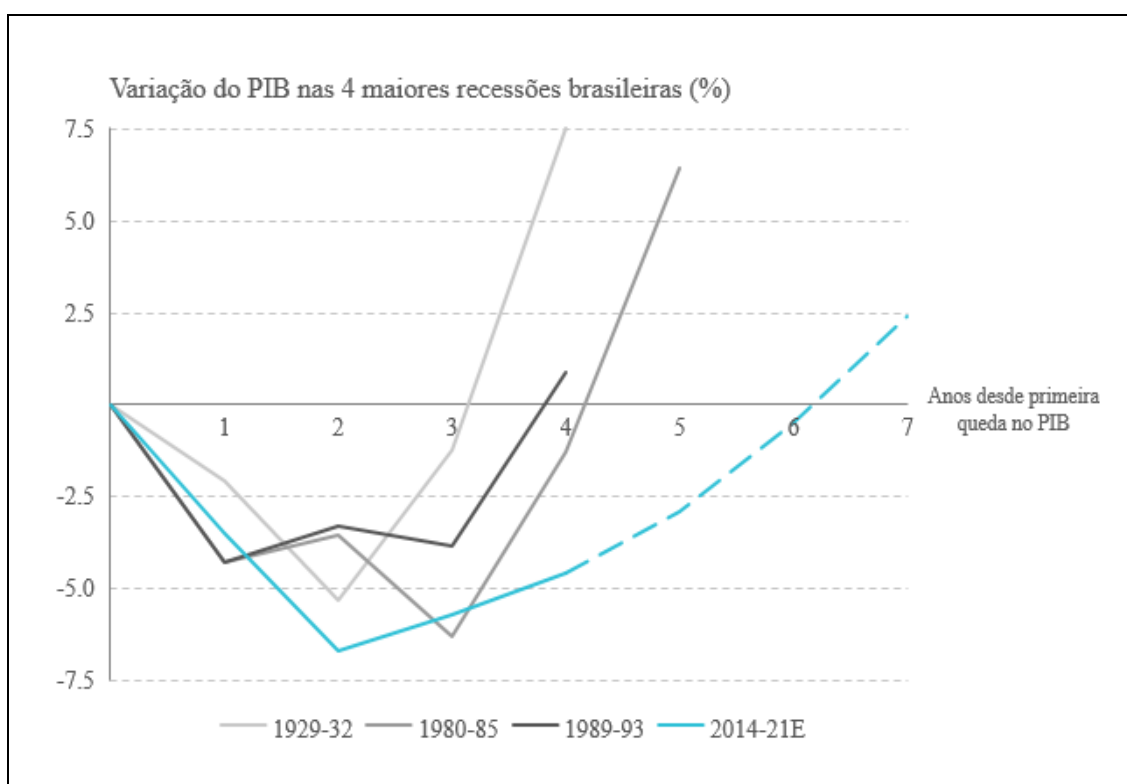
A B2W construiu uma robusta estrutura de serviços para complementar e obter sinergias com o negócio chave da empresa, o comércio eletrônico. Principalmente a partir da introdução do *Marketplace*, a empresa passou a explorar serviços complementares aos comerciantes parceiros que utilizam sua plataforma de forma a suportar os empreendedores com menor estrutura com sua expertise e estrutura da operação própria. Apesar de, em geral, os maiores utilizadores dos serviços serem os *sellers*, estes também são vendidos separadamente. Dentre os principais serviços oferecidos, destacam-se:

- Soluções Logísticas, oferecendo serviços como entrega e logística reversa;
- Soluções Tecnológicas, oferecendo plataformas de gestão e acompanhamento que podem ser conectadas aos sites;
- Soluções de Inteligência, oferecendo produtos e programas de automação e marketing de performance.

2.3. Motivação para a otimização da cadeia logística

A economia brasileira enfrentado um cenário desafiador nos últimos anos, quando a crise econômica mais severa e duradoura dos últimos 100 anos levou a uma queda nas vendas e grandes impactos nos lucros de praticamente todas as empresas locais. O cenário econômico ainda não se recuperou completamente, e muitas empresas ainda possuem dificuldades para se reerguer. Segundo projeções, o PIB¹ (Produto Interno Bruto) brasileiro somente irá retornar ao mesmo patamar real² no ano de 2021, como pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 5 - Comparação da variação acumulada do PIB das 4 maiores crises brasileiras da história



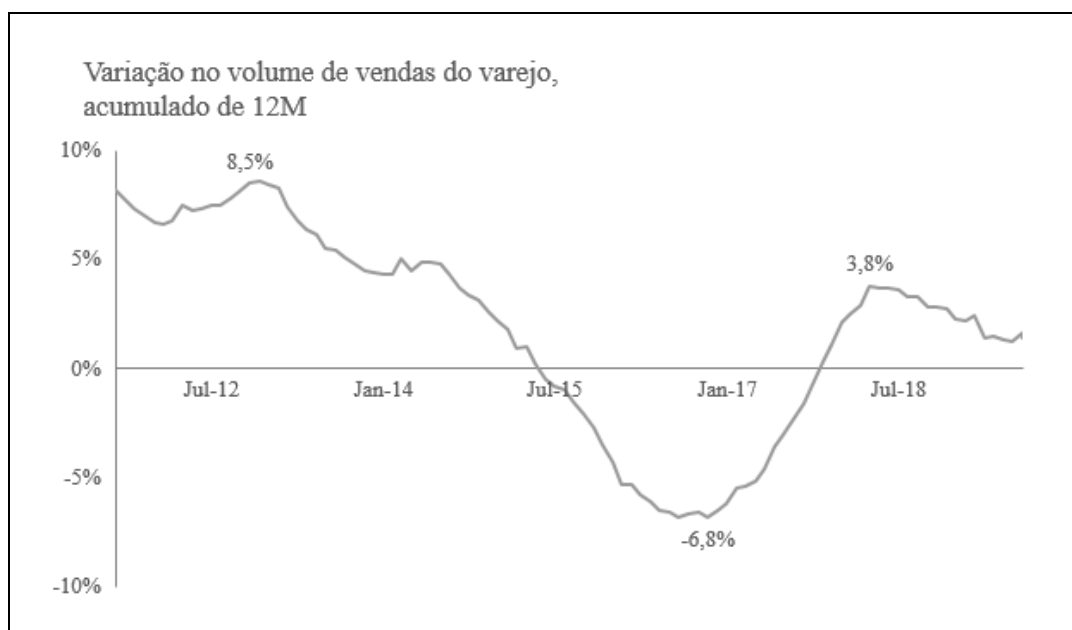
Fonte: Elaborado com dados do IBGE

O varejo foi um dos setores mais impactados pela crise. O alto desemprego, a forte queda na renda disponível da população, além da alta inflação no período, foram alguns fatores que levaram a acentuada queda na demanda por bens de consumo da população. Como ilustrado pelos dados do IBGE no gráfico da Figura 6, a variação no volume de vendas no varejo chegou a se aproximar de -7% em 2016.

¹ Medida de riquezas totais geradas por uma nação no período de 1 ano

² Indicadores econômicos reais são aqueles que desconsideram o efeito da inflação

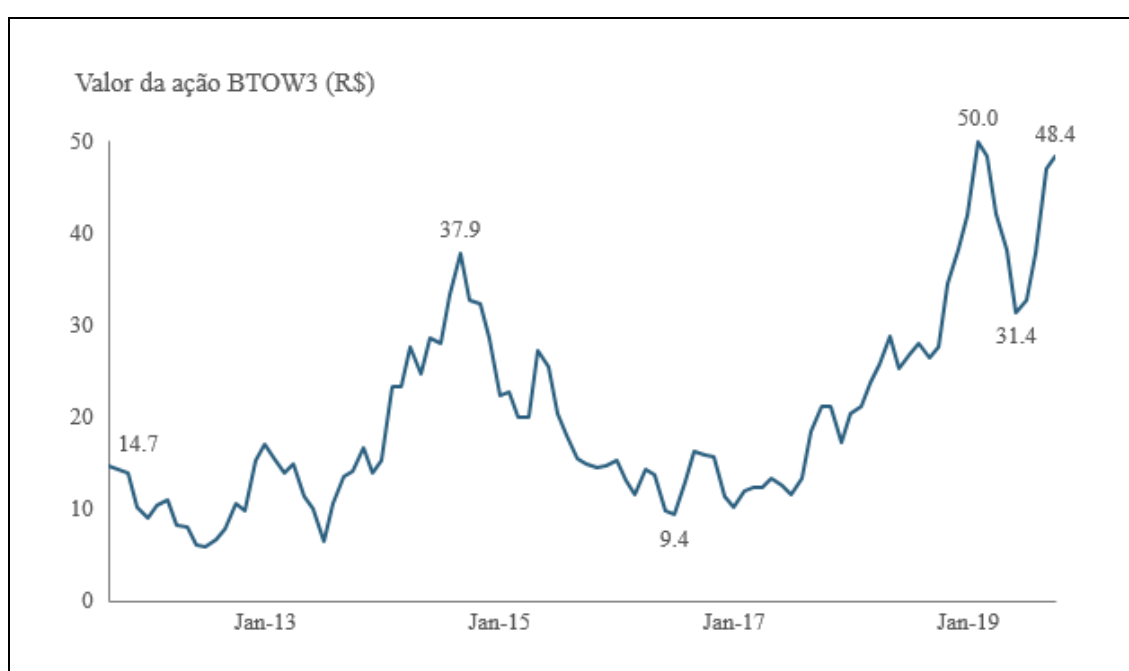
Figura 6 - Variação no volume de vendas no varejo, acumulado de 12 Meses



Fonte: Elaborado com dados da Pesquisa Mensal do Comércio – IBGE

A B2W também sofreu com a forte recessão, e passou por grande desvalorização de mercado quando seus lucros pioraram, como ilustrado pela Figura 7. No entanto, a empresa foi capaz de executar uma estratégia bem-sucedida para seus resultados; que também foram alavancados por uma tímida recuperação do cenário varejista.

Figura 7 – Fechamento mensal do valor da ação da B2W (BTOW3) na B3, de outubro de 2011 a outubro de 2019



Fonte: Elaborado com dados do S&P Capital IQ

Apesar da recente recuperação, o contexto macroeconômico continua desafiador. A crise econômica local aparentemente arrefeceu, mas a recuperação econômica ainda é muito lenta. Em especial tratando-se de um setor competitivo como o varejo, o contexto apenas reforça a necessidade de uma análise constante das alavancas que geram mais valor. Para tal, serão avaliados dois pontos estruturais do varejo eletrônico que tornam essencial a busca por eficiência operacional.

O canal *online* possui vantagens e desvantagens. Ao mesmo tempo que a vitrine virtual amplia os potenciais consumidores para qualquer pessoa que possua um meio de acesso à rede de internet, ela expõe os preços dos competidores de forma mais democrática. Embora a visibilidade entre sites não seja uniforme, todos são acessíveis ao consumidor em instantes.

No caso do varejo, os produtos ofertados em si não possuem diferenças entre si, já que o negócio do varejo se trata da revenda de produtos de dados fornecedores ao público. Esta falta de diferenciação entre produtos leva o preço das mercadorias a ser um fator altamente relevante para a tomada de decisão de compra do cliente. O desafio, que já é comum aos varejistas tradicionais, torna-se ainda mais relevante aos varejistas *online*. Sendo assim, os incumbentes que atuam por este canal de venda encontram-se forçados a competir através de agressiva precificação dos produtos.

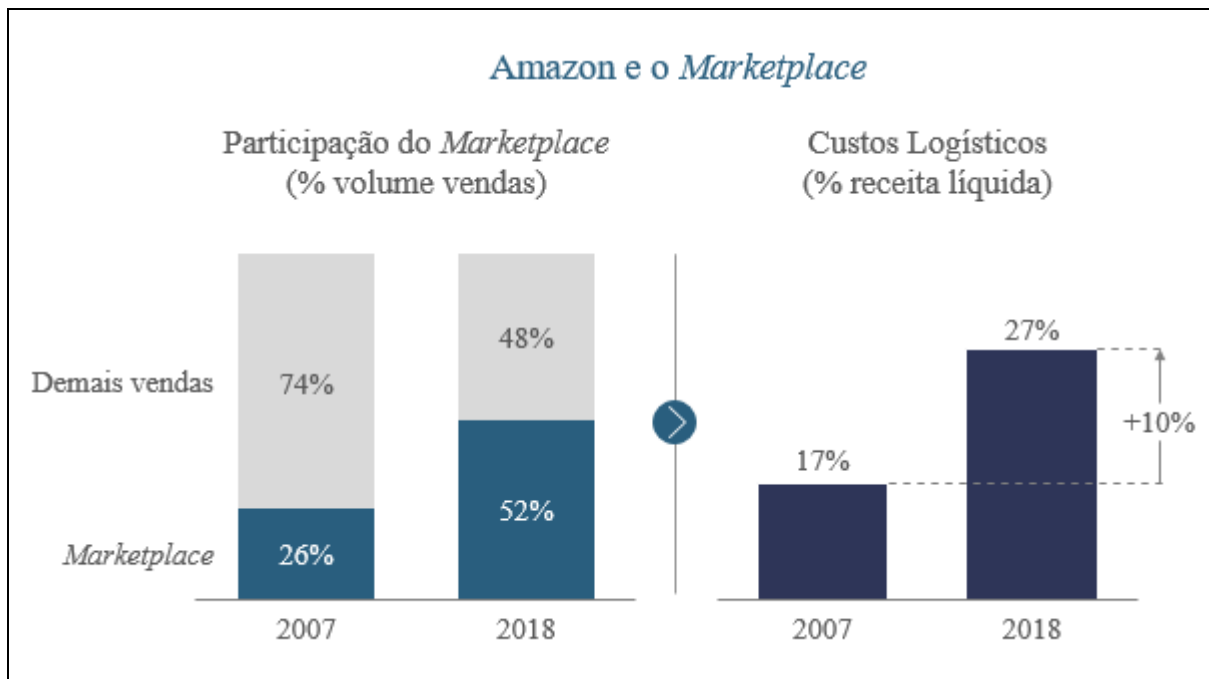
Sendo o preço um fator altamente competitivo e limitado, a busca por sustentação da lucratividade das empresas nesse setor passa por uma corrida de diminuição de custos e despesas. Esta movimentação leva a uma análise em maior detalhe dos gastos operacionais das companhias virtuais. Na ausência de lojas físicas, alguns dos grandes dispêndios comuns entre varejistas tradicionais são eliminados. Restam, de modo simplificado, 2 grandes fatores: custo das mercadorias vendidas, que é o valor pago aos fornecedores dos produtos que serão comercializados; e custos logísticos, que são todos os valores desembolsados no transporte, estocagem e entrega dos produtos vendidos ao cliente final. Enquanto o fator de custo das mercadorias tem potencial de redução limitado, os custos logísticos tem sido alvo de iniciativas, devido ao grande potencial de otimização que a complexa operação permite.

Além disso, há uma outra mudança relevante em curso entre vários dos competidores do varejo eletrônico, e presente em curso na B2W: a migração de modelo de negócio para o uma operação híbrida com o *Marketplace*.

Em voga na estratégia dos principais varejistas mundiais, o modelo de negócio é transformacional. Isto porque, como descrito na Seção 2.1, a empresa operadora da plataforma do *Marketplace* assume um papel de mediadora do comércio entre pequenos negócios e o consumidor final. Sendo assim, a lucratividade da operação do varejo deixa de ser proveniente da margem entre a compra e a revenda de produtos, e passa a ser via oferecimento de serviços. O operador da plataforma recebe uma parcela das vendas do comerciante, porém também lucra com o oferecimento de serviços complementares como suporte tecnológico, venda de informações de mercado e, principalmente, serviços logísticos para a entrega dos produtos vendidos.

Em consequência, a B2W, que possui hoje uma relevante participação do *Marketplace* nas vendas totais, torna-se cada vez mais uma empresa plataforma tecnológica e logística, e não apenas uma varejista. Em face à estratégia, ocorre um fenômeno em que a empresa passa a substituir a estrutura financeira para refletir a nova realidade.

As vendas dos produtos, que representavam a totalidade da receita das empresas, passa a contribuir com apenas o percentual de comissão que fica à empresa. Cresce, no entanto, a receita com serviços tecnológicos e logísticos. Os custos também são substituídos da mesma maneira: ao invés de custos com a compra dos produtos junto aos fornecedores para a revenda, a empresa passa a ter crescentes custos logísticos com o serviço de distribuição das mercadorias dos terceiros. A Amazon, a maior varejista da atualidade, passa exatamente pela mesma transformação, como pode ser avaliado na Figura 8.

Figura 8 - Participação do *Marketplace* e custos logísticos da Amazon

3. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A partir do entendimento do contexto no qual a empresa se insere, este capítulo tem como finalidade introduzir o problema enfrentado pela companhia. Será descrito o escopo do problema a ser estudado, suas motivações e objetivos.

Bem como a maioria dos competidores do mercado em que atua, a B2W também se encontra em busca constante por maior eficiência operacional. Inicialmente, a empresa teve como estratégia internalizar e ter maior controle sobre a operação logística, chave para o sucesso de seu negócio. A empresa comprou as duas principais transportadoras focadas em *e-commerce* do Brasil, a Click-Rodo e Direct, e estabeleceu um acordo com a Vialog, líder em transporte de comércio eletrônico no Sul do país.

Com o objetivo de perseguir e aprofundar a eficiência, a empresa se encontra em curso de uma mudança de impacto relevante. Visando promover maior integração das malhas logísticas da Lojas Americanas e da B2W, em 2018, foi criada a LET's, plataforma de gestão compartilhada dos ativos de logística das duas companhias. A plataforma nasceu com um projeto de transformação da cadeia logística das empresas, tendo como principais objetivos alcançar um melhor atendimento aos clientes e maior eficiência de custos.

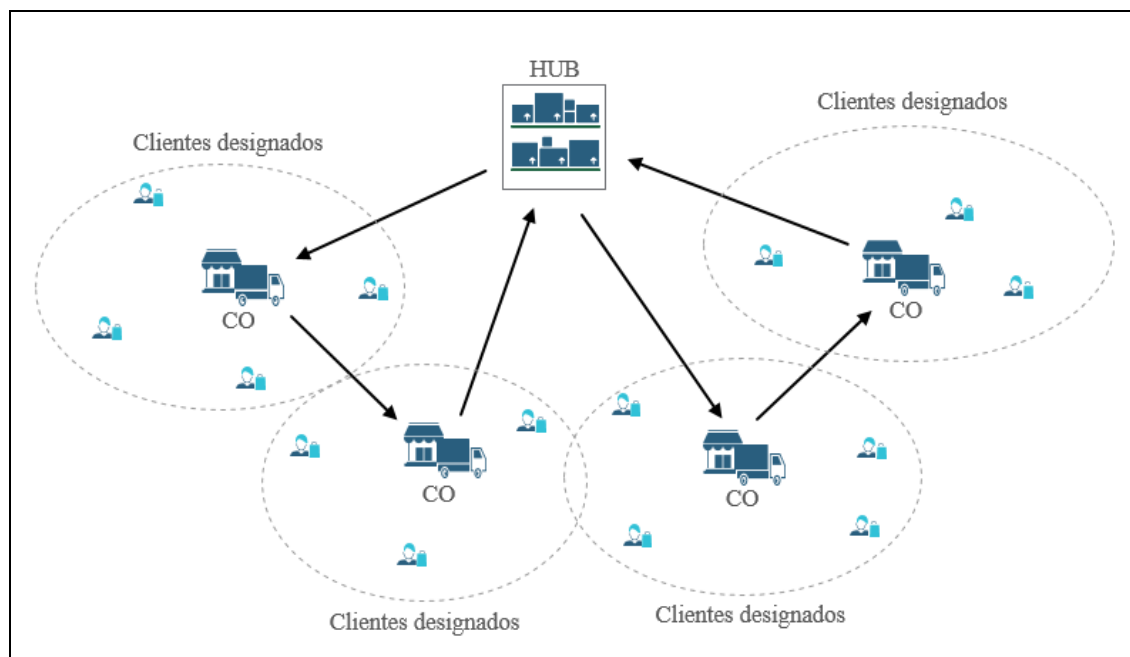
No escopo deste projeto, foram identificadas diversas frentes contendo potenciais iniciativas para promover a integração das malhas em diferentes partes da cadeia logística. Dentro deste contexto, se encontra uma frente específica, proposta como objeto do presente estudo.

Segundo a empresa, a malha atual da B2W conta com: 11 Centros de Distribuição (CD); 200 HUBs, que atuam como centros de distribuição secundários alimentados pelos CDs; e milhares de Centros Operacionais (CO), pontos a partir de onde a distribuição percorre os últimos quilômetros até o cliente, ou, como comumente denominado pela empresa, o atendimento do *Last Mile*.

O escopo do estudo em desenvolvimento será restrito aos níveis da cadeia a partir do HUB. No caso em questão, a instância e o escopo analisados se restringirão a apenas 1 HUB, para uma área de entrega dentro de um estado brasileiro na região Sul. A localidade exata não pode ser revelada por motivos de confidencialidade. No entanto, há altas chances de que haja escalabilidade do método de resolução a outras localidades.

O nível estudado da cadeia de distribuição funciona da seguinte forma: cada entrega tem como origem um único HUB, deve passar necessariamente por um Centro Operacional, e então é transportada até o cliente final. Um esquema representativo pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Esquema representativo do escopo do problema logístico

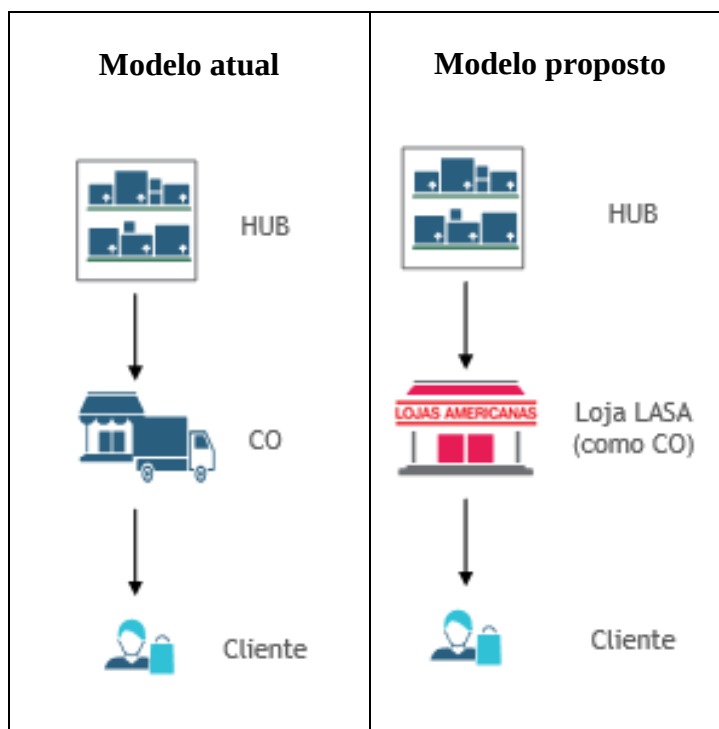


Fonte: Elaborado pelo autor

A cadeia logística da LASA e da B2W já possuem certo nível de integração, graças à utilização dos mesmos Centros de Distribuição e HUBs. Acredita-se, no entanto, que haveriam ganhos expressivos com o aprofundamento da integração para níveis mais granulares da cadeia logística, onde há sinergias resultantes com potencial de geração de expressivas economias de custos e despesas operacionais, principalmente devido aos possíveis ganhos de escala com o compartilhamento dos imóveis e de caminhões na cadeia de abastecimento.

Nesse contexto, a LET'S possui um projeto com a proposta de revisar a configuração da cadeia logística atual analisando a possibilidade de adaptação das lojas físicas das Lojas Americanas como Centros Operacionais, como ilustrado na Figura 10. A operacionalidade por trás da adaptação está no aproveitamento da estrutura de estoques existentes nas lojas físicas como pontos intermediários de distribuição, de onde partiriam os veículos que realizam a entrega das mercadorias vendidas *online* aos clientes finais. A estrutura atual das lojas físicas já possui docas para a descarga de caminhões, que podem ser utilizadas para carga/descarga como Centros Operacionais.

Figura 10 - Ilustração do modelo logístico atual e do proposto



Fonte: Elaborado pelo autor

Com a iniciativa, a B2W tem como objetivo minimizar custos fixos de utilização de Centros Operacionais, bem como os custos fixos e variáveis relacionados ao transporte das mercadorias entre HUB e CO, que incluem a manutenção da frota de veículos e o frete, além dos custos fixos e variáveis relacionados ao transporte de mercadorias dos COs aos clientes, que é feito por frota externa.

Em face da iniciativa de utilizar lojas físicas da LASA como possíveis COs, será necessário realizar uma profunda reavaliação deste elo da cadeia de distribuição, uma vez que tem potencial de reestruturar a logística atual de forma considerável. A alternativa é atrativa pois o compartilhamento de imóveis e de entregas com as lojas físicas possibilita trazer sinergias consideráveis. A iniciativa tornaria a estrutura de custos mais atrativa não somente aos COs, mas à operação como um todo: já que promove uma integração mais profunda da cadeia da LASA e B2W, o que, por consequência, diminui a quantidade necessária de diferentes rotas e veículos.

Para o estudo do problema considerado, é imprescindível o entendimento profundo da operação logística em estudo. Será, portanto, conduzido um breve aprofundamento sobre o tema.

Como ilustrado na Figura 10, cada entrega tem origem em um HUB, passa necessariamente por um Centro Operacional, de onde parte para o cliente final.

Um HUB funciona como um centro de abastecimento dos Centros Operacionais. No caso estudado, o HUB não será estudado em profundidade, pois considera-se que sua capacidade é suficientemente grande para atender a toda a demanda. Seus custos, por consequência, estão fora do escopo de análise, pois não reflete qualquer mudança na decisão final.

O abastecimento dos Centros Operacionais é feito a partir de rota própria da B2W, e, por isso, a empresa planeja e opera suas rotas, cujos custos são relevantes para o problema. Cada rota é operada por um caminhão ativo, e pode atender a 1 ou mais Centros Operacionais, dependendo da capacidade do veículo que executa a rota, bem como a quantidade de pacotes que deve ser entregue em cada CO. Ou seja, a capacidade de uma rota é igual à capacidade do veículo por ela utilizada.

A frota de veículos que executa estas rotas é locada, e possui grande flexibilidade, não constituindo, portanto, uma restrição em questão de dimensionamento. No entanto, há vários tipos de veículos que podem realizar as rotas, e cada um deles possui parâmetros únicos: cada um possui um custo fixo diário de aluguel; custo de frete *Line Haul* (R\$/km), ou seja, o frete é variável; capacidade de carga, medida em número de pacotes.

Cada Centro Operacional deve ser abastecido por uma, e apenas uma, rota de acordo com a demanda que ele deve atender. A demanda designada a cada CO, por sua vez, é equivalente à demanda das áreas de entrega a ele alocadas, também denominadas Pontos de Entrega (PE).

Um Centro Operacional funciona como um nó de transbordo necessário entre o HUB e um atendimento de Ponto de Entrega, e por isso, funciona como um agregador de demandas. O período médio que um pacote permanece em um CO é menor do que um dia, e, não será estudado mais a fundo. Seu funcionamento é, portanto, muito simples: o CO deve receber um pacote proveniente do HUB via rota, armazená-lo temporariamente e então expedi-lo ao cliente final. Como os Centros Operacionais, são em sua maioria, terceirizados, não se entrará no detalhe da operação; no entanto, sabe-se que os custos fixos de operação que ele gera e a capacidade máxima que ele suporta são devidos ao espaço físico disponível e funcionários que realizam a operacionalização do depósito.

O transporte realizado entre o CO e o PE é realizado inteiramente por terceiros, e por isso não sofrerá um estudo minucioso de roteirização. O custo de alocação entre ambos é um valor pago aos terceiros para o atendimento da demanda *Last Mile*, com também é chamada a operação. Este custo, no geral, é pago em relação a cada pacote entregue, e varia de acordo com as distâncias percorridas.

Os Pontos de Entrega são, na prática, cidades. Cada um deles possui uma demanda diária, medida em número de pacotes, e é atendido por um, e apenas um CO.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo se dedica à revisão da literatura das obras científicas já realizadas sobre o tipo de problema enfrentado. Foram analisados, portanto, os principais autores nos temas de roteirização, localização e alocação, com o objetivo de buscar uma maior compreensão e embasamento para o desenvolvimento deste trabalho.

Em primeiro lugar, são apresentados os conceitos chave do tipo de problema enfrentado, mapeando as principais definições e classificações do problema. Em seguida, são explorados os principais métodos de resolução já desenvolvidos, tanto para a solução exata quanto para aproximadas, a partir de metodologias heurísticas.

4.1. Problemas de localização e roteirização

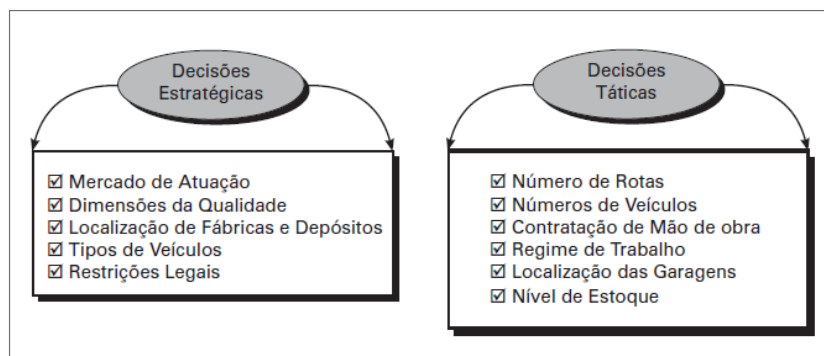
Problemas de localização são problemas clássicos e relevantes em Pesquisa Operacional. Para Ballou (XXX), “localizar instalações fixas ao longo da rede de cadeia de suprimentos é uma decisão que dá forma, estrutura e contorno ao conjunto completo dessa cadeia”. Goldbarg e Luna (2005) também ressalta que, dados os altos custos fixos característicos do problema, o impacto econômico com a utilização de técnicas de otimização neste contexto é enorme e de longo prazo.

Arenales *et al.* (2007) cita diversas aplicações típicas no setor público e privado. Os autores ressaltam que em muitas ocasiões, em particular em sistemas de distribuição, as decisões de localização de facilidades e a designação de clientes a estas facilidades são realizadas concomitantemente; como é o caso deste trabalho.

O tema de roteamento de veículos, generalizado pelo clássico problema VRP – *Vehicle Routing Problem*, foi introduzido pela primeira vez por Dantzig e Ramser (1959). Para Laporte (2009), o problema é central para a administração de cadeias de distribuição e deve ser rotineiramente resolvido pelos operadores logísticos.

Goldbarg e Luna (2005) afirma que é mais comum que decisões de escolha de locais para a instalação de estabelecimentos esteja mais ligado à estratégia do negócio, enquanto as decisões ligadas à roteirização são tomadas a nível mais operacional. Algumas das principais decisões e seus níveis gerenciais mais comuns são ilustradas na Figura 11.

Figura 11 - Nível gerencial de algumas decisões de roteirização e localização



Fonte: Goldbarg e Luna (2005)

Para Belfiore (2006), “uma das principais dificuldades de se modelar e resolver um problema de roteirização de veículos advém da grande quantidade de parâmetros que podem influenciar o tipo de problema”. A classificação dos problemas facilita a priorização dos aspectos mais relevantes para o problema em estudo. Com esta preocupação, o autor realiza uma coletânea dos problemas de roteirização, com base nos trabalhos de Bodin *et al.* (1983) e Desrosiers (1988). Há alguns tipos mais relevantes para o escopo do problema deste trabalho, e serão abordados a seguir.

- **Problema Clássico de Roteirização de Veículos (*Vehicle Routing Problem-VRP*)**

O problema de roteirização mais clássico tem como objetivo minimizar custos encontrando o melhor conjunto de rotas possível que atendam às seguintes condições: iniciam e terminam no depósito, de modo que a demanda de todos os nós é atendida; demanda determinística.

O problema clássico de roteirização, porém, dá espaço para diversas adições de complexidade, incluindo diversas restrições, variáveis e mecanismos no modelo. Algumas das mais relevantes variações são agregadas por Belfiore (2006):

- **Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos (*Multi-Depot Vehicle Problem-MDVRP*):** nesta variação, são possíveis múltiplos depósitos ao invés de um único;
- **Problema de Roteirização de Veículos com Demanda Estocástica (*Stochastic Vehicle Routing Problem-SVRP*):** a variação substitui a demanda determinística por uma demanda estocástica;

- **Problema de Roteirização de veículos com Entregas Fracionadas (*Vehicle Routing Problem with Split Deliveries-VRPSD*):** esta variação permite o abastecimento de um ponto de demanda por mais de um veículo;
- **Problema de Dimensionamento e Roteirização de uma Frota de Veículos Heterogênea (*Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem-FSMVRP*):** nesta variação, a frota de veículos é ilimitada e heterogênea, ou seja, consiste em determinar não somente a configuração das rotas como a composição em termos de tipo de veículo.

Entre os alguns dos estudos de variações incluindo restrições temporais do problema clássico de roteirização, podem ser citados os trabalhos de Solomon (1987), Desrochers, Desrosiers e Solomon (1992) e Bräysy, Hasle e Dullaert (2004), que envolvem estudos com janelas de tempo e *scheduling*.

Goldbarg e Luna (2005) também sugere que, dada a complexidade dado pelo número de variáveis e restrições no problema de roteirização, é importante examinar e classificar o tipo de problema com o qual se está lidando. Dada a diversidade de variações possíveis, existem diversas classificações possíveis para este tipo. Segundo Cunha (2000), uma das mais relevantes até hoje é a classificação clássica proposta por Bodin *et al.* (1983). No entanto, Min; Jayaraman e Srivastava (1998) propuseram uma classificação taxonômica para os problemas mistos de localização e roteirização, que abrange de forma mais completa o escopo deste trabalho. A classificação pode ser visualizada na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação taxonômica de problemas mistos de localização e roteirização

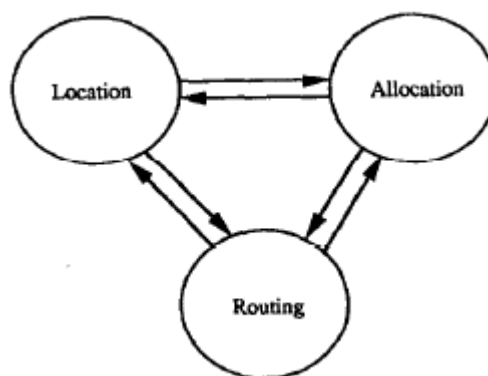
Parâmetro de classificação	Alternativas de classificação
Nível Hierárquico	<i>i.</i> Um nível (distribuição) <i>ii.</i> Dois níveis (distribuição e coleta)
Natureza da oferta/demanda	<i>i.</i> Determinística <i>ii.</i> Estocástica
Número de instalações que se quer localizar	<i>i.</i> Uma instalação <i>ii.</i> Múltiplas instalações
Tamanho das frotas de veículos	<i>i.</i> Veículo único <i>ii.</i> Múltiplos veículos
Capacidade dos veículos	<i>i.</i> Sem restrição de capacidade <i>ii.</i> Com restrição de capacidade
Capacidade dos centros de distribuição	<i>i.</i> Sem restrição de capacidade <i>ii.</i> Com restrição de capacidade
Camada dos centros de distribuição	<i>i.</i> Primária (veículos partem de CDs para clientes finais)

	ii. Secundária/Intermediária (há paradas intermediárias em depósitos)
Horizonte de planejamento	i. Período único ii. Múltiplos períodos (dinâmico)
Janela de tempo	i. Não especificada e sem prazos ii. Janela de tempo folgada e com prazos flexíveis iii. Janela de tempo restrita e com prazos rígidos
Função Objetivo	i. Único objetivo ii. Múltiplos objetivos
Tipo de dados no modelo	i. Hipotético ii. Real

Fonte: Adaptado de Min e Jayaraman e Srivastava (1998)

Para Perl e Daskin (1985), a interdependência entre localização de centros de distribuição e roteirização de veículos tem sido amplamente reconhecida, no entanto, pouco explorada. Os autores definem o problema misto WLRP (*Warehouse Location-Routing Problem*) como uma resolução simultânea de roteirização e localização de depósitos. Sua formulação é uma variação abrangente incluindo parâmetros comuns em distribuição logística. O problema misto clássico é o LRP (*Location-Routing Problem*), que para Wu, Low e Bai (2002), é uma compilação de 3 sub-problemas: (1) localização de facilidades, (2) alocação de demanda e (3) roteirização de veículos. A relação também foi ressaltada por Perl (1983), como representado pela Figura 12.

Figura 12 - Interdependência entre decisão de localização, alocação e roteamento



Fonte: (Perl, 1983)

Outros autores que também se dedicaram à formulação e à apresentação de algoritmos para algumas variações do LRP. Alguns deles são Golden *et al.* (1977), Or e Pierskalla (1979), Srikar e Srivastava (1983), Perl (1983), além dos já citados.

Em uma outra aplicação similar do problema misto, Moshref-Javadi e Lee (2016) introduziram o LLRP (*Latency Location-Routing Problem*), onde a localização de depósitos e a roteirização dos veículos no problema visam minimizar os tempos de entrega aos recipientes, ao contrário do problema clássico de minimização pura de custos relacionados à distância. Segundo os autores, entre as principais aplicações estão a distribuição de suprimentos em atividades de socorro pós-desastre e distribuição em cadeias de valor altamente voltadas aos clientes.

Tendo em vista a pesquisa desenvolvida em torno do tema, foi possível encontrar problemas similares em questão de tipologia, porém o problema em questão, onde a roteirização é realizada para um elemento e nível diferentes, não foi encontrado nas principais fontes como um problema recorrente. Torna-se necessário, portanto, a adaptação das resoluções para os problemas similares para o escopo enfrentado por este trabalho.

Min; Jayaraman e Srivastava (1998) também propuseram uma classificação para os métodos de resolução para o problema misto, como pode ser visualizado na Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação dos métodos de resolução para o problema misto de localização e roteirização, segundo Min; Jayaraman e Srivastava (1998)

Classificação dos métodos	Tipos de métodos
Algoritmos Exatos	<i>Branch and Bound</i> /Pesquisa direta em árvores
	Programação dinâmica
	Programação inteira
	Programação não-linear
Heurísticas	Localização-alocação primeiro, roteirização em seguida
	Roteirização primeiro, localização-alocação em seguida
	Economia/Inserção
	Melhoria/Troca

Fonte: Adaptado de Min; Jayaraman e Srivastava (1998)

4.2. Modelagem de problemas similares

É apresentada, a seguir, uma formulação de PLIM do problema clássico de roteirização de veículos, de Fisher e Jaikumar (1981), como ponto de partida para estudos mais profundos.

Constantes

K = número de veículos;

N = número de clientes que devem ser atendidos; índice 0 denota o depósito central;

b_k = capacidade (peso ou volume) do veículo k ;

a_i = tamanho da entrega para o cliente i ;

c_{ij} = custo da viagem direta do cliente i ao cliente j .

Variáveis de decisão

$y_{ik} = 1$, se a ordem do cliente i é atendida pelo veículo k ; 0, caso contrário;

$x_{ijk} = 1$, se o veículo k viaja diretamente do cliente i ao cliente j ; 0, caso contrário.

Formulação

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = K \quad i = 0 \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = 1 \quad i \in 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ijk} = y_{jk} \quad \forall j \in N, \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ijk} = y_{ik} \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i, j \in S \times S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad SC\{1, \dots, n\}, 2 \leq |S| \leq n - 1, \forall k \in K \quad (6)$$

$$y_{ik} = 0 \text{ ou } 1 \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (7)$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ ou } 1 \quad \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in K \quad (8)$$

A formulação envolve 2 conhecidos problemas combinatórios de otimização. As restrições (2) a (4) são comuns aos problemas gerais de designação e garantem que cada rota inicie e

finalize no depósito, que cada cliente seja servido por algum veículo, e que o carregamento alocado a um veículo esteja de acordo com sua capacidade. As restrições (5) a (8) definem a problemática do caixeiro viajante, conectada ao resto do problema pela variável y_{ik} .

Tendo sido exposto o problema clássico de roteirização, será explorado também o problema de localização. A seguir, será apresentada a formulação do problema clássico das P-medianas (ARENALES *et al.*, 2007).

Variáveis de decisão

y_i : 1, se a facilidade é aberta; 0, caso contrário.

Parâmetros do problema

J = conjunto de nós j que representam os clientes;

I = conjunto de locais i candidatos à localização de facilidades;

q_i = demanda do cliente j ;

q_i = demanda do cliente j .

Formulação

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{i \in W} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in J \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I} y_i = p \quad (4)$$

$$x \in B^{|I||J|}, y \in B^{|I|} \quad (5)$$

Arenales *et al.* (2007) também apresenta uma simples modificação no modelo clássico, incluindo uma capacitação limitada para as facilidades. Para incluir uma capacidade Q à facilidade no local i , as restrições (3) são modificadas para (6).

$$\sum_{i \in I} q_j x_{ij} \leq Q_i y_i \quad \forall i \in I \quad (6)$$

Arenales *et al.* (2007) apresenta, por fim, uma diferente formulação para a função objetivo, incluindo um custo fixo f para a abertura dos depósitos representados pela variável y (7).

$$\min \sum_{i \in I} f_j y_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

Perl e Daskin (1985) propõe em seu trabalho uma formulação PLIM para o problema misto de localização e roteirização, o denominado WLRP (*Warehouse Location-Routing Problem*). O modelo apresentado compreende a possibilidade de inclusão de uma extensa gama de parâmetros. O problema consiste em determinar o número, tamanho e localização dos depósitos, a alocação de clientes a eles e as rotas de entrega aos clientes, com o objetivo de minimizar a soma dos custos de transporte e estoque.

Assim como o presente trabalho, a formulação inclui a presença de dois níveis na cadeia de suprimentos: um nível da fonte de suprimento até os depósitos e um outro até os clientes. As maiores diferenças entre o trabalho de Perl e Daskin (1985) e este recaem sobre o tipo de problema enfrentado, já que os autores realizam a roteirização entre os depósitos e os clientes, enquanto este trabalho se dedicará à roteirização entre fonte de suprimento e os depósitos; além de que o problema é trabalhado por ele com uma frota homogênea em sua formulação básica. Para ilustrar a complexidade da formulação de Perl e Daskin (1985), será apresentada em (8) a função objetivo.

Principais parâmetros

d_{ij} = distância entre os pontos i e j ;

q_i = demanda do cliente i ;

FC_j = custo fixo de estabelecer o CD j ;

VC_j = custo variável por unidade de vazão do CD j ;

CT_{sj} = custo unitário da fonte de suprimento s para o CD j ;

CM_k = custo por milha para o veículo de entrega na rota k .

Variáveis

$X_{ghk} = 1$, se o ponto g precede h na rota k ; 0, caso contrário;

$Y_{ij} = 1$, se o cliente i é alocado ao CD j ; 0, caso contrário;

$Z_j = 1$, se o cliente i é alocado ao CD j ; 0, caso contrário;

f_{sj} = quantidade transportada do ponto de suprimento s para o CD j .

Função Objetivo

$$\min \sum_{j=N+1}^{N+M} FC_j \cdot Z_j + \sum_{s=1}^S \sum_{j=N+1}^{N+M} CT_{sj} \cdot f_{sj} + \sum_{j=N+1}^{N+M} VC_j \left(\sum_{i=1}^N q_i Y_{ij} \right) + \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^{N+M} \sum_{h=1}^{N+M} CM_k \cdot d_{gh} \cdot X_{ghk} \quad (8)$$

4.3. Metodologias heurísticas para problemas similares

Segundo Winston (1987), principalmente quando se trata de programação inteira, muitas vezes a utilização de algoritmos que forneçam a solução exata se torna impraticável. Segundo o autor, frequentemente são utilizados métodos heurísticos para a obtenção de soluções de boa qualidade. As metodologias, porém, não necessariamente atingem a solução ótima.

Arenales *et al.* (2007) listou algumas situações em que se torna interessante a abordagem de resolução via métodos heurísticos:

- Situações em que um método de resolução exato não está disponível, ou exige tempo/ memória computacional além da capacidade dos recursos;
- Situações em que o ganho econômico ou técnico não justifica o esforço na geração de uma solução ótima;
- Situações em que é utilizada em conjunto a um método exato, como por exemplo gerando soluções iniciais para um método exato.

Para Laporte (2009), há 5 razões mais comuns para utilizar-se do tipo de método:

- i. Facilidade de implementação;

- ii. Alcançar melhorias sobre a solução em prática atualmente;
- iii. Resultados rápidos em relação a otimizações;
- iv. Robustez em relação a soluções exatas;
- v. Uso em rotinas de otimização.

Ao desenvolver uma variação incluindo janelas de tempo ao problema clássico de roteamento de veículos, Solomon (1987) ressaltou que ao envolver em sua modelagem uma complexidade adicional à modelagem clássica do VRP (*Vehicle Routing Problem*), que é NP-hard, seu problema também seria NP-hard. Laporte (2009) também ressalta que os melhores algoritmos exatos para resolução de problemas VRP são capazes de resolver apenas pequenas instâncias, enquanto instâncias reais são geralmente maiores. O trabalho aqui desenvolvido, tratando-se também de uma variação que adiciona complexidade ao problema clássico, trata-se de um nível de complexidade equiparável à de Solomon.

Segundo Papadimitriou e Steiglitz (1998), problemas NP-completos e NP-hard em geral requerem um tempo computacional exponencial, e, portanto, são impraticáveis a não ser em pequenas instâncias.

Vale também citar a definição de heurística dada por Goldberg e Luna (2005, p.196):

Uma heurística é uma técnica que busca alcançar uma boa solução utilizando um esforço computacional considerado razoável, sendo capaz de garantir a viabilidade ou a otimalidade da solução encontrada ou, ainda, em muitos casos, ambas, especialmente nas ocasiões em que essa busca partir de uma solução viável próxima ao ótimo.

Na Figura 13, os autores também apresentam uma sugestão de classificação para os tipos de heurísticas, embora relembre que há muitas possíveis classificações. A classificação se separa em dois níveis.

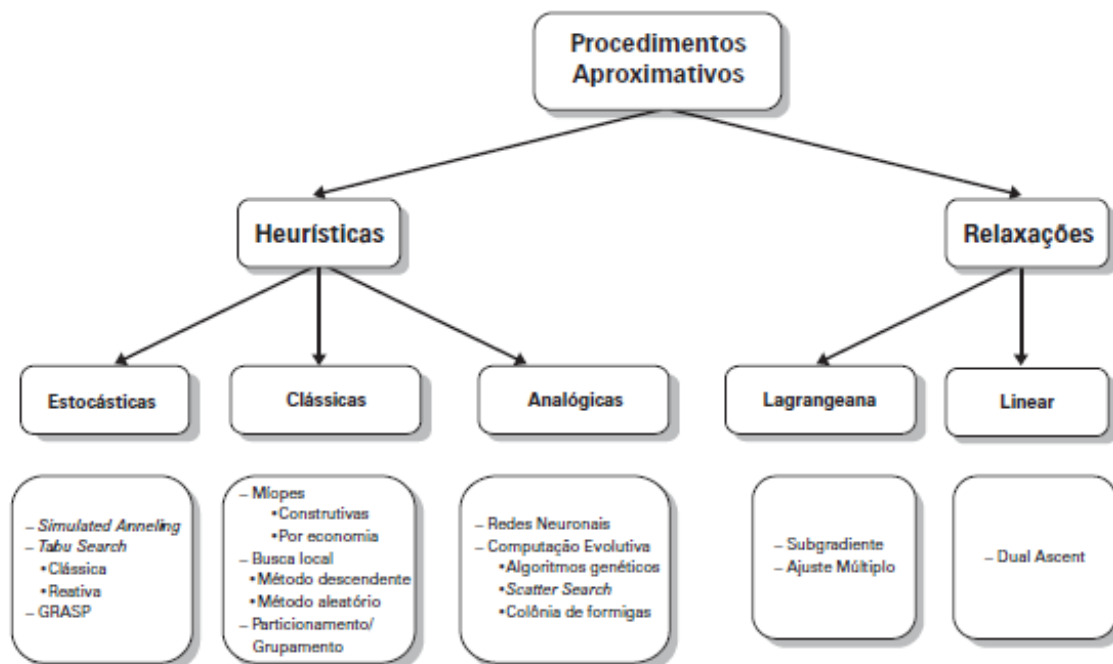
No primeiro nível, os autores fazem uma primeira divisão dos métodos aproximativos em

- Heurísticas;
- Relaxações.

No segundo nível, os autores dividem os métodos heurísticos em 3 classificações e apresenta algumas das principais variações:

- Estocásticas;
- Clássicas;
- Analógicas.

Figura 13 - Classificação dos procedimentos aproximativos



Fonte: Goldberg e Luna (2005)

Silver (2004) também dedicou-se à organização e explanação dos diferentes tipos de métodos heurísticos. Para o autor, as heurísticas podem ser organizadas nas 7 categorias, embora considere que não são necessariamente mutuamente exclusivas:

- Soluções geradas aleatoriamente;
- Decomposição/particionamento do problema;
- Métodos indutivos;
- Métodos que reduzem o espaço da solução;
- Métodos aproximativos;
- Métodos construtivos;
- Métodos de pesquisa local.

5. METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO

Neste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada como base para o processo de resolução do problema. A formalização desta metodologia é necessária não somente como estrutura básica para este trabalho. Principalmente tratando-se de uma grande organização, torna-se importante garantir que estejam alinhados os processos utilizados para a resolução de qualquer outro problema adequado à utilização de pesquisa operacional dentro da empresa, seja ele logístico ou de outra área; seja seu caráter operacional, tático ou até mesmo estratégico. Além disso, sendo este um problema escalável para outras localidades além do escopo atual, é possível que a metodologia de resolução seja replicada para outras localidades, tornando-se ainda mais relevante a padronização do método utilizado neste trabalho.

Como base para o presente trabalho, foi utilizada a metodologia de sete etapas proposta por WINSTON (2003), que é sumarizada na Tabela 5.

Tabela 5 - Etapas da metodologia proposta

Etapa	Descrição da etapa
Etapa 1: Formulação do Problema	Especificação dos objetivos e das partes da organização a serem estudadas
Etapa 2: Observação do sistema	Recolhimento de dados e estimativa dos parâmetros que afetam o problema da organização
Etapa 3: Formulação de um modelo matemático para o problema	Desenvolvimento do modelo matemático do problema, com a utilização de técnicas matemáticas apropriadas para os sistemas do modelo
Etapa 4: Verificação e uso do modelo para predição	Verificação sobre a acurácia do modelo como representação da realidade, checando se os resultados são condizentes como predição da realidade
Etapa 5: Selecionar uma alternativa adequada	Determinação da melhor alternativa na direção dos objetivos da organização
Etapa 6: Apresentar os resultados e conclusão do estudo	Apresentação do modelo, das alternativas e recomendação da melhor solução para a organização ou tomador de decisão.
Etapa 7: Implementar e avaliar recomendações	Implementação das recomendações e monitoramento do sistema para garantia de que a solução atende aos objetivos da organização

Fonte: Adaptado de Winston (2003)

O primeiro passo para qualquer resolução de um problema é a boa compreensão de quais são os objetivos a serem alcançados com um determinado estudo; que deveriam ser também condizentes com os objetivos gerais de qualquer organização. Sem uma clara definição, corre-se o risco de não priorizar o objetivo com maior potencial de gerar valor à organização. Em

pesquisa operacional, isto se traduz na formulação de uma função objetivo, que traduz os objetivos do problema em uma função que se busca minimizar ou maximizar.

Uma vez definido o problema, deve-se entender profundamente o funcionamento da operação atual. Esta etapa se dedica a entender como é o funcionamento do sistema em geral, a partir do correto levantamento de dados e a especificação de constantes, restrições e variáveis para a tomada de decisão. Este passo é essencial no momento de traduzir este comportamento em mecanismos e parâmetros a serem incorporados no modelo.

Para o desenvolvimento deste trabalho, por motivos de confidencialidade de dados, a participação do autor na elaboração das duas primeiras etapas foi reduzida, e não houve contato direto com a operação, mas sim com interlocutores da organização. No entanto, houve uma importante interação entre a empresa e autor para garantir o correto desenvolvimento da resolução do problema que a empresa deseja resolver.

O terceiro passo trata-se da formulação de um modelo matemático que procure representar a realidade do sistema. Nesse passo, utilizam-se diversas técnicas matemáticas que buscam refletir restrições aos valores possíveis de uma certa variável ou refletir algum comportamento que um conjunto de variáveis e restrições devem reproduzir.

O próximo passo trata-se da validação do modelo, onde busca-se garantir que ele é uma acurada representação da realidade. Este passo é essencial antes de qualquer tomada de decisão, e deve sempre ser revisitado para garantir que os parâmetros, restrições e mecanismos funcionam de forma correta e atualizada com a situação de uso.

A quinta etapa trata da seleção da solução a ser recomendada. Esta fase trata de aplicar as metodologias de resolução do problema para chegar às soluções pretendidas. Tendo as alternativas de solução em mãos, é importante perguntar-se se os objetivos da organização estão de fato sendo cumpridos pelas recomendações.

O sexto passo consiste na apresentação do estudo à organização estudada. Convém, nesta etapa, apresentar o estudo de mais de um cenário de solução, para que o tomador de decisão possa ter mais de uma alternativa pela qual decidir. Isto porque nem sempre todos os objetivos ou considerações sobre um problema podem ser traduzidos em restrições e mecanismos algébricos.

Nesta etapa, uma solução recomendada que não for aceita pelo tomador de decisão pode ser reflexo de uma falha no correto entendimento do problema ou em não ter o tomador de decisão envolvido desde o início do desenvolvimento do estudo.

A última etapa trata-se da implementação e avaliação da recomendação. Tendo a solução sido aceita, passa-se ao último passo, onde as partes envolvidas devem unir esforços para implementar a solução de maneira correta. Com a solução em efetividade, deve-se, por fim, monitorar os resultados e garantir que a solução habilita a organização ao atingimento de seus objetivos, atualizando o modelo para incorporar possíveis mudanças no comportamento da realidade.

Este último passo não pode ser implementado de forma completa em tempo hábil de conclusão e publicação deste estudo, e por isso não terá o resultado aqui publicado. O presente trabalho foca nas etapas de definição e investigação do problema e entendimento de seu contexto, construção de modelo para a representação do problema, aplicação de métodos de resolução, bem como na análise e interpretação dos resultados e recomendações.

6. LEVANTAMENTO DE DADOS

Tendo definidos os objetivos a serem alcançados pelo estudo e seu escopo, é possível passar à etapa de levantamento de dados. Como descrito na metodologia, esta etapa tem como objetivo levantar as variáveis, parâmetros e restrições que serão utilizados na modelagem matemática.

Idealmente, esta etapa envolve o levantamento de informações e dados sobre o sistema de forma organizada, através de entrevistas, levantamento e análise de bases de dados e possivelmente até mesmo experimentos. Nesta etapa, a metodologia sugerida e descrita no Capítulo 5 guia os responsáveis pela resolução do problema se preocupando em entender o funcionamento do sistema como um todo e representá-lo na forma de parâmetros, restrições e variáveis, buscando sempre simular a realidade da forma mais fiel possível.

Esta etapa é de suma importância para garantir que o modelo matemático retrate a realidade e gere resultados de boa qualidade e confiabilidade. Uma modelagem acurada somente pode ser feita a partir do correto e exato levantamento de dados e organização adequada das informações. Além disso, para evitar retrabalhos e iterações durante a fase de modelagem, torna-se imprescindível assegurar um bom alinhamento dos mecanismos e restrições por trás de cada elemento do problema para serem traduzidos no modelo, a partir de clarificações que muitas vezes somente ocorrem tendo em mãos os dados reais do problema.

No caso do trabalho desenvolvido, todo o processo de levantamento de dados e entendimento mútuo do problema foi realizada juntamente a interlocutores na empresa, que conhecem bem a operação logística da B2W. Em primeiro lugar, foram conduzidas reuniões para um alinhamento do conhecimento do problema entre as partes, o que envolveu discussões frequentes acerca do escopo de desenvolvimento do estudo e implicações que o funcionamento do sistema e de suas peculiaridades como modelagem.

Em seguida, foram disponibilizados os dados da operação logística da empresa. Tendo alinhado o escopo do problema, a empresa divulgou o levantamento de dados, que foram utilizados tal qual recebidos, evitando inferências adicionais. O levantamento interno por parte da empresa foi realizado internamente junto aos respectivos responsáveis por cada dado dentro da área logística. Para cada conjunto de dados obtidos e organizados na Tabela 6, será feita uma breve descrição e ilustração.

Tabela 6 - Estrutura de dados disponibilizados pela empresa

Elo da cadeia	Rótulo do dado	Índices dos dados	Parâmetro
Malha de abastecimento (HUB-CO)	Distância dos trajetos	• CO de Origem • CO de Destino	• Distância (km)
	Informações dos Veículos	• Tipo Veículo	• Capacidade (no. de pacotes) • Custo Fixo • Frete Variável (R\$/km)
	Informações dos Centros Operacionais	• Centro Operacional	• Capacidade Expedição (no. de pacotes) • Custo de Utilização • Existente/ Loja LASA
Malha de atendimento da demanda (CO-PE)	Alocação de Pontos de Entrega	• CO de Origem • PE de Destino	• Custo de Alocação (Last Mile)
	Demanda dos Pontos de Entrega	• Ponto de Entrega	• Demanda (no. de pacotes)

Fonte: B2W

O primeiro conjunto de dados na Tabela 6 é referente à distância na malha de abastecimento, medida em quilômetros, para o trajeto entre cada nó de origem e nó de destino, dentro de todos os possíveis deslocamentos entre Centros Operacionais. A distância entre nós foi uma estimativa realizada pela LET'S.

O segundo conjunto de dados descreve as especificações para cada diferente tipo de veículo utilizado na malha de abastecimento dos COs. O dado de capacidade refere-se ao máximo número de pacotes que cada veículo suporta como carga. O Custo Fixo refere-se a um custo de utilização incorrido por dia de utilização de um veículo de determinado tipo. Por fim, o Frete Variável é o custo estimado por km para o deslocamento de cada tipo de veículo, para cobrir custos de combustível e pedágios. Todos os parâmetros foram disponibilizados pela transportadora.

Em seguida, analisa-se as informações referentes aos Centros Operacionais. O primeiro dado, a Capacidade de Expedição, refere-se ao número máximo de pacotes que um dado CO é capaz expedir em um dia. O Custo de Utilização, por sua vez, representa uma estimativa dos custos diários para manter a operação de um CO. Estes custos, no caso de COs existentes, tratam-se principalmente de custos diários para cobertura de aluguel e salários para manutenção da operação diária; já no caso da adaptação de lojas físicas. A diferenciação não interfere na estrutura de modelagem de problema; ambos os tipos serão tratados de maneira igual na tomada

de decisão. No entanto, a informação será essencial para a análise dos resultados, pois permite responder à questão sobre as vantagens de se utilizar lojas físicas da LASA como CO.

O próximo conjunto de dados diz respeito ao Custo de Alocação dos Pontos de Entrega aos Centros Operacionais; custo presente na malha de abastecimento da demanda. O dado se trata de uma estimativa dos custos totais de atendimento da demanda de um dado PE de Destino por cada CO de Origem. O valor é calculado como na equação abaixo:

$$\text{Custo Alocação} = \text{Demanda} \cdot (\text{Fixo por pacote} + \text{Variável por pacote} \cdot \text{Distância})$$

Onde

- Valor fixo por pacote: é um custo tabelado para a entrega de uma unidade de produto, que difere por determinadas faixas de distância;
- Valor variável por pacote: é um fator de custo adicional por quilômetro rodado;
- Distância: é a distância entre Centro Operacional e Ponto de Entrega a ele designado.

Por fim, o último conjunto de dados se refere à Demanda de cada Ponto de Entrega, medida em número de pacotes. A demanda utilizada no desenvolvimento deste trabalho trata-se de uma demanda determinística diária calculada, para cada Ponto de Entrega, com base em uma demanda histórica, utilizando-se de uma média simples. O cálculo trata-se de uma simplificação da realidade para fins de modelagem, uma vez que a demanda no setor do varejo de bens de consumo possui acentuada sazonalidade. O fator deverá ser levado em conta com análises de *stress* do modelo, que deverão ser conduzidas mais adiante.

Uma informação relevante sobre o último elo da cadeia de distribuição, e que pode auxiliar quanto ao entendimento dos conceitos de dados e cálculos, é o fato de que os Centros Operacionais e o transporte até os Pontos de Entrega, também chamado de *Last Mile*, na maioria dos casos atuais são terceirizados, e por isso possuem diferente estrutura de custos.

É também importante notar, no entanto, que os dados reais da empresa possuem caráter confidencial. Sendo assim, as instâncias utilizadas por este trabalho foram geradas com base em dados reais do cenário efetivo, porém sofreram um certo nível de tratamento. Além dos próprios dados, a solução atualmente efetivada pela empresa também foi obtida com base em na situação real.

7. MODELAGEM DO PROBLEMA

No presente Capítulo, é apresentada e detalhada a formulação matemática do problema. Inicia-se por uma exposição sobre as principais entradas e restrições do problema. Por fim, será melhor detalhado o modelo para a resolução do problema, caracterizado como Programação Linear Inteira Mista (PLIM), e o funcionamento individual e conjunto de suas restrições.

7.1. Introdução ao modelo

Nesta seção, serão expostos, em primeiro lugar, os parâmetros e restrições tratados pelo problema. Em seguida, serão apresentados os mecanismos utilizados no modelo para o funcionamento integrado das restrições e da otimização tratada pela função objetivo para cada parte do problema, que é misto de roteirização e alocação.

7.1.1. Elementos do problema

A B2W atende um determinado conjunto de pontos de entrega, a partir de um único HUB - que funcionará como um centro de distribuição, no escopo da modelagem. Cada ponto de entrega é uma região que concentra um certo número de potenciais clientes. Neste problema, será abordada a cobertura de um conjunto P de pontos de entrega de um determinado HUB.

Cada ponto de entrega contará com demanda que deve ser necessariamente atendida. Para fins de modelagem do problema, será considerada uma demanda média determinística diária para cada ponto de entrega, considerando dados históricos dos clientes. Sendo assim, a demanda DP de cada Ponto de Entrega pode ser interpretada como o número de pacotes médio.

As entregas que partem do HUB devem necessariamente passar por um Centro Operacional (CO) antes de chegarem aos clientes finais nos pontos de entrega; funcionam, portanto, como pontos de transbordo para as mercadorias entre HUB e cliente. No entanto, nem todos os COs presentes no conjunto W^* , que inclui centros operacionais candidatos, são necessariamente utilizados. Dessa forma, cada CO possui um custo fixo de utilização CU , incorrido se ele é utilizado, além de uma capacidade CR de número de remessas que é capaz de expedir.

Por fim, há V diferentes tipos de veículos possíveis que podem realizar as rotas, sendo todos eles ilimitados em relação à quantidade utilizada. Cada tipo de veículo possui características diferentes entre si. Cada vez que um veículo é utilizado por uma rota, um custo fixo diário CF

e um custo variável F em R\$/km são incorridos. Além disso, cada tipo de veículo possui uma determinada capacidade volumétrica CV , o que limita a quantidade transportada por rota.

7.1.2. Problema de roteirização

O primeiro elo de transporte, entre HUB e Centros Operacionais, é realizado por frota própria da B2W. Para este trecho, será feita uma roteirização, onde serão definidos todos os trajetos, constituídos por cada arco entre nó de origem e de destino, que farão parte da rota R . Neste caso, cada nó será um dos elementos presentes e ativados dentro do conjunto W , onde estão presentes o HUB e os Centros Operacionais candidatos. Para cada arco possível entre nó de origem e de destino em W , há uma distância S , que, multiplicada pelo frete variável F do tipo de veículo escolhido, computará o custo variável.

Cada rota no conjunto R de rotas é equivalente a um veículo ativo, ou seja, quando houver uma rota ativa, há um veículo do tipo V designado ao percurso atribuído. Como não são permitidas entregas fracionadas, o número máximo de rotas permitidas será igual ao número de Centros Operacionais no conjunto W^* , uma vez que, no limite, cada CO seria atendido por uma rota exclusiva, e todas as rotas em R seriam ativas; com cada veículo realizando transporte exclusivamente para um CO.

7.1.3. Problema de localização e alocação

Já no elo final da cadeia, entre Centros Operacionais e Pontos de Entrega, é feito por terceiros. Dessa forma, a associação de cada Ponto de Entrega ao CO que o atenderá, passará por uma simples alocação, conforme a matriz de custos CA , composta pelos custos estimados de entrega caso cada uma das alocações possíveis aconteça.

A designação de cada Ponto de Entrega em P aos Centros Operacionais candidatos W , no entanto, é dependente e realizada em conjunto à escolha de localização destes COs. Isto porque só poderá ser alocado um PE a um CO ativo, e a abertura de um CO acarreta na necessidade de abastecimento provindo de um veículo ativo R e no desembolso de um custo fixo de utilização CU .

7.2. Formulação do modelo

Principais Restrições

- Toda a demanda dos pontos de entrega deve ser atendida;
- As entregas devem passar pelos nós de transbordo;
- COs possuem capacidade de expedição diária CR ;
- Cada tipo de veículo é sujeito a uma diferente capacidade volumétrica CV .

Principais hipóteses e características do problema

- A demanda dos Pontos de Entrega é determinística;
- Não há diferenciação por tipo de mercadoria para o CO, considera-se apenas volume e número de remessas como características da demanda;
- As entregas são únicas e o horizonte de planejamento é de um dia, onde os dados simulam uma demanda média diária;
- A frota de veículos para a roteirização é heterogênea e ilimitada;
- Os custos fixos e variáveis de roteirização variam conforme tipo de veículo;
- Não são permitidas entregas fracionadas; apenas um veículo entrega para um CO, e apenas um CO atende a um Ponto de Entrega;
- Todos os veículos iniciam e terminam o trajeto no HUB;
- Não há restrições de tempo.

Conjuntos

- W : Conjunto de Centros Operacionais e HUB;
- W^* : Conjunto de Centros Operacionais (excluí HUB);
- R : Conjunto de rotas disponíveis;
- V : Conjunto de tipo de veículos;
- P : Conjunto de pontos de entrega;

Parâmetros

- S_{ij} : Distância entre dois nós i e j do conjunto W , que compreende os centros operacionais e HUB;
- CU_i : Custo fixo de utilização de Centro Operacional i ;

- CV_v : Capacidade em número de pacotes do tipo de veículo v ;
- CE_i : Capacidade de expedição, em número de pacotes, do Centro Operacional i ;
- CF_v : Custo fixo unitário de utilização do tipo de veículo v em uma rota qualquer;
- F_v : Frete variável em (R\$/km) para cada tipo de veículo v ;
- CA_{pi} : Custos de atendimento do ponto de entrega p pelo Centro Operacional i ;
- DP_p : Demanda em número de pacotes de cada ponto de entrega p .

Variáveis de decisão

x_{ij}^{rv} : 1, se o Centro Operacional j é atendido após i pelo roteiro r e tipo de veículo v ; 0, caso contrário

y_i : 1, se o Centro Operacional i é ativado; 0, caso contrário;

z_i^p : 1, se o ponto de entrega p é atendido pelo Centro Operacional i ; 0, caso contrário;

t_r^v : 1, se a rota r é atendida pelo veículo do tipo v ; 0, caso contrário;

k_r : 1, se a rota r é ativa; 0, caso contrário;

o_i : ordem de atendimento do Centro Operacional i ; Inteira;

e_i^r : quantidade, em número de pacotes, entregue para o Centro Operacional i , pela rota r ; Inteira.

Modelagem matemática do problema:

$$\min \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} CF_v t_r^v + \sum_{i \in W} \sum_{j \in W} \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} S_{ij} F_v x_{ij}^{rv} + \sum_{i \in W} \sum_{r \in R} y_i^r CU_i + \sum_{i \in W} \sum_{p \in P} CA_{pi} z_i^p \quad (1)$$

$$\sum_{i \in W} x_{if}^{rv} - \sum_{j \in W} x_{fj}^{rv} = 0 \quad \forall r \in R, \forall f \in W, \forall v \in V \quad (2)$$

$$O_i + 1 - M \left(1 - \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} x_{ij}^{rv} \right) \leq O_j \quad \forall i \in W, \forall j \in W^* \quad (3)$$

$$Mk_r \geq \sum_{j \in W^*} \sum_{v \in V} x_{ij}^{rv} \quad \forall r \in R \quad (4)$$

$$\sum_{j \in W^*} \sum_{v \in V} x_{0j}^{rv} - k_r = 0 \quad \forall r \in R \quad (5)$$

$$y_j = \sum_{r \in R} \sum_{i \in W} \sum_{v \in V} x_{ij}^{rv} \quad \forall j \in W^* \quad (6)$$

$$\sum_{i \in W^*} z_i^p = 1 \quad \forall p \in P \quad (7)$$

$$\sum_{p \in P} z_i^p \leq My_i \quad \forall i \in W^* \quad (8)$$

$$t_r^v = \sum_{j \in W^*} x_{0j}^{rv} \quad \forall r \in R, \forall v \in V \quad (9)$$

$$\sum_{r \in R} e_i^r = \sum_{p \in P} DP_p z_i^p \quad \forall i \in W^* \quad (10)$$

$$\sum_{j \in W^*} e_j^r \leq \sum_{v \in V} CV_v t_r^v \quad \forall r \in R \quad (11)$$

$$M \sum_{v \in V} \sum_{i \in W^*} x_{ij}^{rv} \geq e_j^r \quad \forall j \in W^*, \forall r \in R \quad (12)$$

$$\sum_{p \in P} z_i^p DP_p \leq CE_i \quad \forall i \in W^* \quad (13)$$

$$x_{ij}^{rv} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, r, v \quad (14)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in W^* \quad (15)$$

$$z_i^p \in \{0,1\} \quad \forall i \in W^*, p \in P \quad (16)$$

$$t_r^v \in \{0,1\} \quad \forall r \in R, v \in V \quad (17)$$

$$k_r \in \{0,1\} \quad \forall r \in R \quad (18)$$

$$e_i^r \in \mathbb{Z} \quad \forall r \in R, v \in V \quad (19)$$

$$o_i \in \mathbb{Z} \quad \forall i \in W \quad (20)$$

7.3. Detalhamento do modelo

Nesta seção, será detalhada a formulação matemática da função objetivo e de cada uma das restrições do modelo, destacando a lógica na qual se baseiam as principais associações.

$$\text{Função Objetivo (1):} \quad \min \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} CF_v t_r^v + \sum_{i \in W} \sum_{j \in W} \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} S_{ij} F_v x_{ij}^{rv} + \sum_{i \in W} \sum_{r \in R} y_i^r CU_i + \sum_{i \in W} \sum_{p \in P} CA_{pi} z_i^p$$

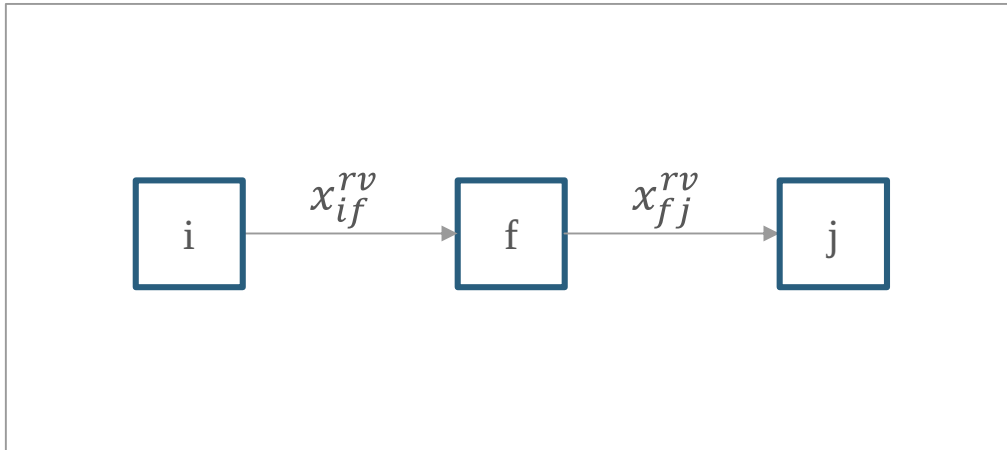
A função objetivo deste modelo busca minimizar as 4 componentes de custo do problema:

1. Custos fixos de utilização dos veículos nos roteiros entre HUB e Centros Operacionais;
2. Custos variáveis de frete nos roteiros entre HUB e Centros Operacionais;
3. Custos fixos de utilização de um Centro Operacional;
4. Custos de alocação entre Centros Operacionais e Pontos de entrega.

$$\text{Restrição (2): } \sum_{i \in W} x_{if}^{rv} - \sum_{j \in W} x_{fj}^{rv} = 0 \quad , \quad \forall r \in R, \forall f \in W, \forall v \in V$$

Conservação dos fluxos de entrada e saída de cada elemento em W , para cada veículo ativo. Para cada arco de entrada x_{if}^{rv} positivo em um nó, em uma rota r e um tipo de veículo v , deve haver um arco positivo de saída x_{fj}^{rv} . Esta restrição também garante que será usado o mesmo veículo e tipo de veículo durante todo o trajeto, pois se um dado veículo r do tipo v entra, ele deve sair. O contrário vale para o caso onde a variável assume valor 0 (nulo), permitindo a existência de fluxos contínuos nas rotas e tipos de veículos. O mecanismo é ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Ilustração da conservação de fluxos para um dado nó f



Fonte: Elaborado pelo autor

$$\text{Restrição (3): } O_i + 1 - M(1 - \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} x_{ij}^{rv}) \leq O_j \quad , \quad \forall i \in W, \forall j \in W^*$$

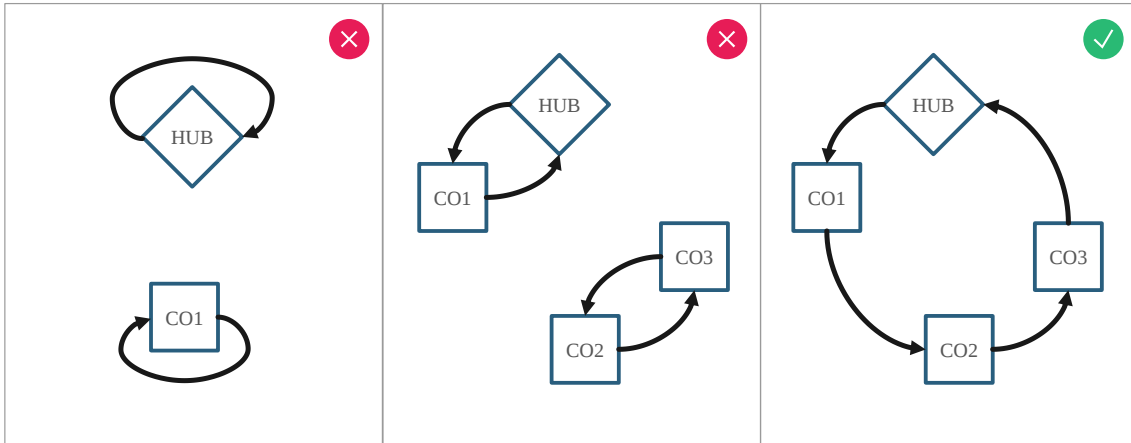
Elimina a formação de *subtours*, ou seja, rotas sem conexão ao restante do roteiro completo. A restrição designa um ordenamento O a cada entrega aos Centros Operacionais, e garante que, entre dois consecutivos COs i e j , haja um acréscimo em pelo menos 1 unidade na variável inteira O quando $\sum_{r \in R} x_{ij}^{rv} = 1$, ou seja, quando o elemento j for atendido após i por alguma rota. Dessa maneira, quando j é atendido após i , $O_j \geq O_i + 1$, e portanto haverá uma ordenação sempre crescente entre os nós subsequentes em uma rota.

Esta restrição é uma adaptação da formulação de Belfiore (2006) para o mesmo fim. Também utilizada em um problema de roteirização, originalmente, a forma utilizada previu o sequenciamento temporal. No caso, somava-se ao instante um tempo de chegada do veículo ao nó de origem o tempo de atendimento neste nó e o tempo de deslocamento até o nó subsequente. Desta forma, restringiu-se a volta a um nó com passagem anterior.

Neste estudo, na falta de contabilidade temporal, a lógica utilizada para substituí-la foi a adição de uma unidade positiva (1) em uma variável de sequenciamento, garantindo um ordenamento positivo crescente dentro de uma mesma rota.

A restrição é essencial para o correto funcionamento da roteirização, já que as demais restrições, como a conservação de fluxos (restrição 2), não restringem a visita a um nó anterior ou a ele mesmo, como pode ser ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Exemplos de rotas com e sem subtours



Fonte: Elaborado pelo autor

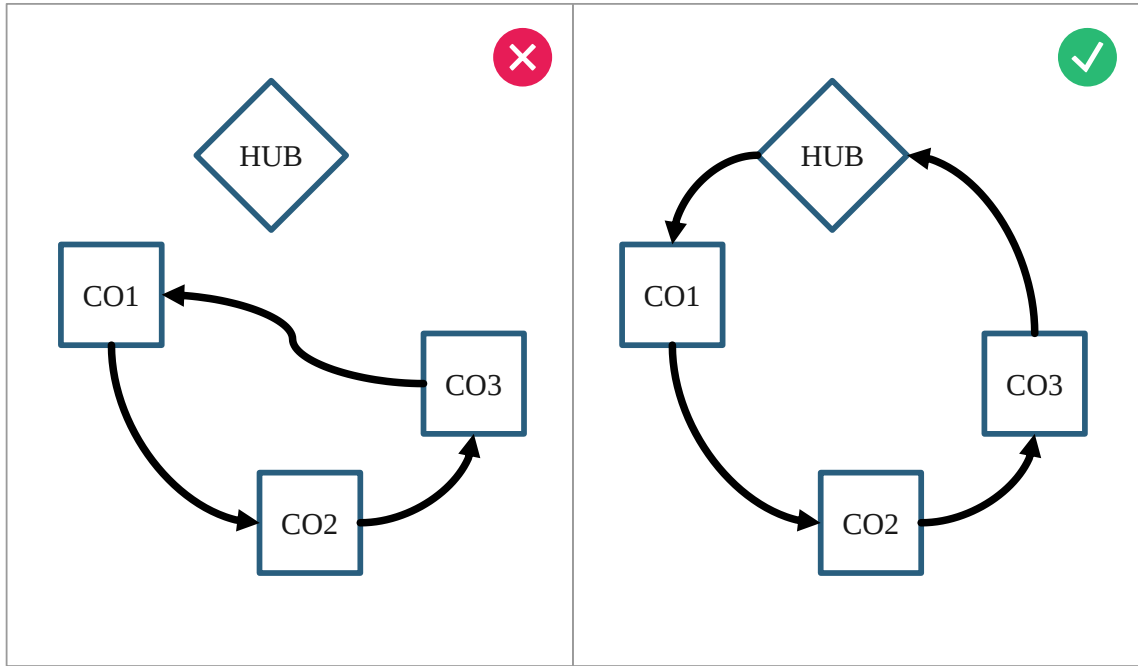
Restrição (4): $Mk_r \geq \sum_{i \in W} \sum_{j \in W^*} \sum_{v \in V} x_{ij}^{rv} \quad , \quad \forall r \in R$

A restrição ativa a variável k_r se a rota r existe. Se há algum fluxo existente em alguma rota r , para qualquer tipo de veículo v e entre quaisquer Centros Operacionais, então a rota r é ativa e a variável k_r terá valor positivo (1).

Restrição (5): $\sum_{j \in W^*} \sum_{v \in V} x_{0j}^{rv} - k_r = 0 \quad , \quad \forall r \in R$

Se rota existe, ela parte do HUB. Além disso, também determina que deve haver no máximo um único veículo escolhido em uma rota, pois a variável k somente pode assumir valor de 0 ou 1. Esta restrição garante que o HUB seja incluso na rota, uma vez que sua ausência seria permitida por todas as demais restrições. A restrição é ilustrada na Figura 16.

Figura 16 - Exemplo de rota sem passagem pelo HUB, e de uma rota correta



Fonte: Elaborado pelo autor

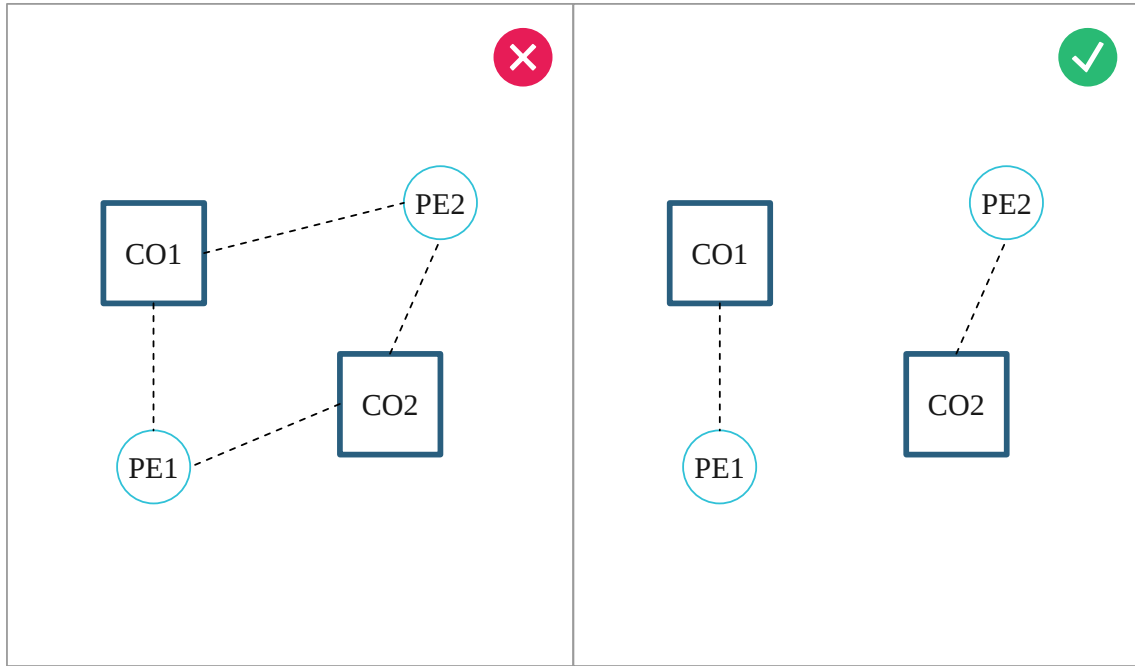
$$\text{Restrição (6): } y_j = \sum_{r \in R} \sum_{i \in W} \sum_{v \in V} x_{ij}^{rv} \quad , \quad \forall j \in W^*$$

Determina quais COs são utilizados. Se há um fluxo de entrada x_{ij}^{rv} proveniente de qualquer CO i , de qualquer rota r e tipo de veículo v , então a variável y_j , que se refere ao CO j , terá valor de 1. A igualdade somente ocorre pois somente uma rota e um tipo de veículo será utilizado, garantindo que o valor da somatória no conjunto V e no conjunto R seja igual a 0 ou 1.

$$\text{Restrição (7): } \sum_{i \in W^*} z_i^p = 1 \quad , \quad \forall p \in P$$

Garante que cada Ponto de Entrega p seja atendido por um Centro Operacional i , apenas. Esta restrição se aplica neste problema pois não são possíveis entregas fracionadas entre COs para um mesmo Ponto de Entrega, ou seja, um único CO pode ser alocado para atender a um PE. A restrição é ilustrada na Figura 17.

Figura 17 - Exemplo de alocação fracionada e alocação única de Pontos de Entrega



Fonte: Elaborado pelo autor

Restrição (8): $\sum_{p \in P} z_i^p \leq M y_i$, $\forall i \in W^*$

Se há um Ponto de Entrega P que está alocado ao Centro Operacional i , então este Centro Operacional deve ser ativado e o valor de y_i deve ser 1.

Restrição (9): $t_r^v = \sum_{j \in W^*} x_{0j}^{rv}$, $\forall r \in R, \forall v \in V$

Associa cada rota r ao tipo de veículo v a ela designado. Se, para uma dada rota r e o tipo de veículo v existe um fluxo positivo de saída do HUB, então a variável t_r^v é ativada e seu valor será 1.

Restrição (10): $\sum_{r \in R} e_i^r = \sum_{p \in P} DP_p z_i^p$, $\forall i \in W^*$

Designa a cada Centro Operacional i a demanda em número de pacotes DP_p associada pela alocação de cada cliente ao CO dada por z_i^p . A variável inteira e_i^r carrega, portanto, o número total de pacotes encomendado pelo Centro Operacional i para atender à demanda pela qual é responsável.

Restrição (11): $\sum_{j \in W^*} e_j^r \leq \sum_{v \in V} CV_v t_r^v$, $\forall r \in R$

Garante que capacidade CV_v do tipo de veículo escolhido v não será excedida, para cada rota r . Cada Centro Operacional ativo j possui uma encomenda e_j^r em volume de entregas, e cada tipo de veículo v possui capacidade CV_v em número de pacotes. Dessa forma, a somatória $\sum_{j \in W^*} e_j^r$ das encomendas dos Centros Operacionais atendidos em uma rota r não podem ultrapassar a capacidade do tipo de veículo v escolhido.

Além disso, a restrição também é importante para garantir que todo e_i^r será 0 caso não haja uma rota r sendo utilizada para atender ao Centro Operacional j .

$$\text{Restrição (12): } M \sum_{v \in V} \sum_{i \in W} x_{ij}^{rv} \geq e_j^r \quad , \quad \forall j \in W^*, \forall r \in R$$

Limita entregas fracionadas nas entregas HUB-CO, já que uma única rota deve atender às encomendas de um dado Centro Operacional j . A restrição garante que a variável e_j^r somente se torne um valor não nulo caso o Centro Operacional j esteja sendo atendido pela rota r , ou seja, caso haja um fluxo positivo x_{ij}^{rv} para o CO j na rota r .

$$\text{Restrição (13): } \sum_{p \in P} z_i^p DP_p \leq CE_i \quad , \quad \forall i \in W^*$$

Garante que a capacidade diária de expedição CE_i de cada Centro Operacional i não será excedida pela quantidade de pacotes dos pontos de entrega a ele alocados por z_i^p .

Restrições (14 a 20):

$$x_{ij}^{rv} \in \{0,1\} \quad , \quad \forall i, j, r, v$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad , \quad \forall i$$

$$z_i^p \in \{0,1\} \quad , \quad \forall i, p$$

$$t_r^v \in \{0,1\} \quad , \quad \forall r, v$$

$$k_r \in \{0,1\} \quad , \quad \forall r$$

$$e_i^r \in \mathbb{Z} \quad , \quad \forall r \in R, \forall i \in W^*$$

$$o_i \in \mathbb{Z} \quad , \quad \forall i \in W$$

Define o domínio das variáveis de decisão do modelo.

7.4. Validação do modelo em problema reduzido

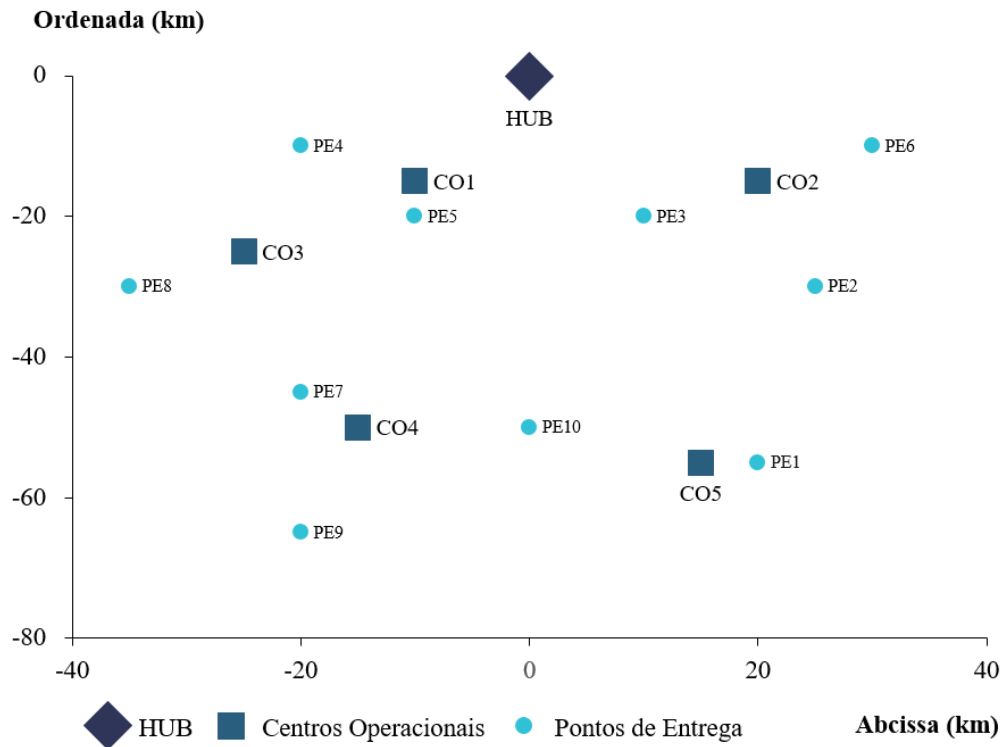
Nesta etapa, foi realizada a resolução exata em problema reduzido e fictício. Para tal, a modelagem foi implementada em código específico e o problema foi resolvido pelo *software* IBM CPLEX OPL com versão 12.9.0

Com o objetivo de testar a modelagem, foram efetuadas diversas simulações com dados fictícios. Em primeiro lugar, durante a construção do modelo, foram feitos diversos testes para verificar a correta associação de valores entre as variáveis interdependentes e funcionamento dos mecanismos de restrição, e assim validar o funcionamento das principais restrições. O segundo passo foi o desenvolvimento de um teste com o problema completo, porém com escala reduzida, com o intuito de observar o comportamento do modelo como um todo.

7.4.1. Descrição do problema fictício

O problema reduzido possui 5 Centros Operacionais candidatos, 10 Pontos de Entrega e 2 Tipos de Veículo disponíveis. A distribuição geográfica dos elementos pode ser visualizada na Figura 18.

Figura 18 - Distribuição geográfica dos elementos do problema fictício



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir das coordenadas dos COs, é possível calcular as distâncias entre cada um dos elementos, que será utilizada para calcular os custos variáveis em frete incorridos na roteirização. As distâncias resultantes são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Distâncias entre HUB e Centros Operacionais

Distâncias (km)	HUB1	CO1	CO2	CO3	CO4	CO5
HUB1	0	18	25	35	52	57
CO1	18	0	30	18	35	47
CO2	25	30	0	46	49	40
CO3	35	18	46	0	27	50
CO4	52	35	49	27	0	30
CO5	57	47	40	50	30	0

Fonte: Elaborado pelo autor

Como descrito anteriormente, cada tipo de veículo possui sua específica característica em termos de custo fixo para utilização, capacidade volumétrica e frete variável em relação à quilometragem percorrida. A relação desses parâmetros pode ser vista na Tabela 8.

Tabela 8 - Custos e capacidade dos tipos de veículos

Veículos	Tipo 1	Tipo 2
Fix (R\$)	R\$ 5,0	R\$ 15,0
Frete (R\$/km)	R\$ 0,2	R\$ 0,3
Cap (m3)	100,0	300,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Os Centros Operacionais também possuem custos fixos de utilização e restrições de capacidade, como apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Restrições e custos dos Centros Operacionais

Centros Op.	Custo Utiliz. (R\$)	Cap (pacotes)
CO1	R\$ 30	250
CO2	R\$ 30	250
CO3	R\$ 30	250
CO4	R\$ 30	250
CO5	R\$ 30	250

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 10, são apresentados os custos de alocação dos Pontos de Entrega aos Centros Operacionais, ou seja, os custos estimados para 1 dia de atendimento da demanda dos PEs por cada CO.

Tabela 10 - Custos de alocação dos Pontos de Entrega aos Centros Operacionais

Custo Alocação	CO1	CO2	CO3	CO4	CO5
P1	R\$ 50	R\$ 40	R\$ 54	R\$ 35	R\$ 5
P2	R\$ 38	R\$ 16	R\$ 50	R\$ 45	R\$ 27
P3	R\$ 21	R\$ 11	R\$ 35	R\$ 39	R\$ 35
P4	R\$ 11	R\$ 40	R\$ 16	R\$ 40	R\$ 57
P5	R\$ 5	R\$ 30	R\$ 16	R\$ 30	R\$ 43
P6	R\$ 40	R\$ 11	R\$ 57	R\$ 60	R\$ 47
P7	R\$ 32	R\$ 50	R\$ 21	R\$ 7	R\$ 36
P8	R\$ 29	R\$ 57	R\$ 11	R\$ 28	R\$ 56
P9	R\$ 51	R\$ 64	R\$ 40	R\$ 16	R\$ 36
P10	R\$ 36	R\$ 40	R\$ 35	R\$ 15	R\$ 16

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 11, encontram-se as demandas em número de pacotes e o número de remessas necessárias para o atendimento de cada ponto de entrega.

Tabela 11 - Demanda volumétrica e em remessas dos Pontos de Entrega

Pontos Entrega	Demanda (pacotes)
P1	50
P2	40
P3	20
P4	60
P5	10
P6	40
P7	50
P8	60
P9	20
P10	40

Fonte: Elaborado pelo autor

7.4.2. Solução do problema fictício

A seguir, serão apresentados os principais resultados do problema fictício desenvolvido. A rodada de solução através do *software* levou aproximadamente 9 segundos para encontrar a solução ótima.

A partir da variável X , é possível depreender a solução para a parte de roteirização e localização do problema, ou seja, as rotas do HUB aos Centros Operacionais. Na Tabela 12, são apresentados apenas os valores não nulos obtidos pela variável, já que a tabela completa possui dimensão igual a $6 \times 6 \times 5 \times 2$ ($W \times W \times R \times V$), ou seja, 360 linhas.

Os valores positivos encontrados na variável x_{ij}^{rv} mostram uma solução ótima com utilização total de 2 rotas, ou seja, 2 veículos. A primeira rota ativa, localizada no slot de rotas 3, é composta pelos arcos 0-2 e 2-0; ou seja, trata-se de uma rota exclusiva entre HUB e o Centro Operacional 2. Neste caso, foi utilizado o tipo de veículo 1. A segunda rota ativa, localizada no slot 5, é composta pelo roteiro 0-1-4-0; ou seja, o veículo sai do HUB, entrega ao Centro Operacional 1 e 4, respectivamente, e retorna ao HUB. Esta rota é atendida pelo tipo de veículo 2.

Tabela 12 - Valores positivos resultantes na variável x_{ij}^{rv} , em relação ao número de rota r , tipo de veículo v , nó de origem i e nó de destino j .

r	v	i	j	$x(i,j,r,v)$
...	...	...	...	0
3	1	0	2	1
3	1	2	0	1
...	...	...	...	0
5	2	0	1	1
5	2	1	4	1
5	2	4	0	1
...	...	...	...	0

Fonte: Elaborado pelo autor

Na parte restante do problema, onde é feita a atribuição de Pontos de Entrega aos Centros Operacionais, z_i^p é a variável chave para entender a solução resultante. Neste caso, a solução ótima resultou: os PEs 1, 7,8,9 e 10 são alocados ao CO 4, os PEs 2,3 e 6 ao CO 2 e os PEs 4 e 5 ao CO 1.

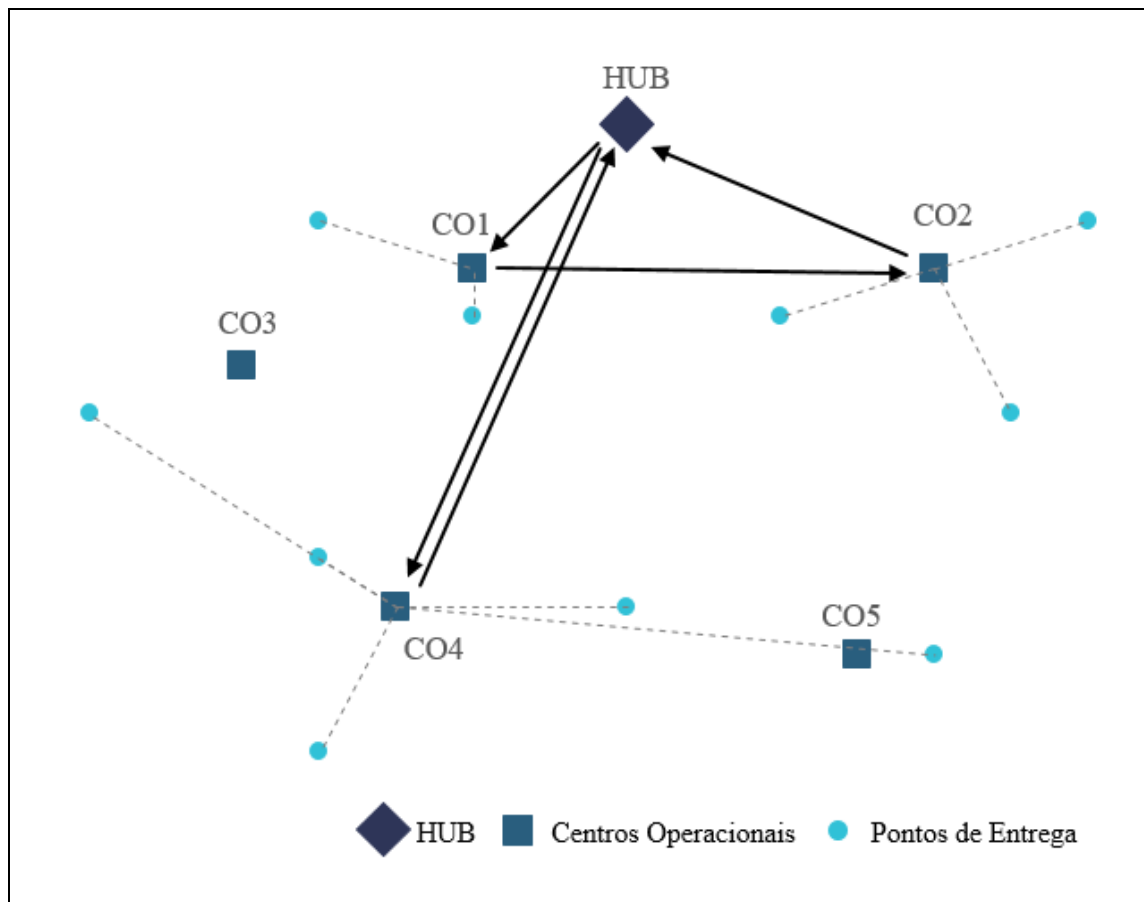
Tabela 13 - Valores resultantes na variável z_i^p , em relação ao Centro Operacional i e Ponto de Entrega e

		Centros Operacionais (i)					
		$z(p,i)$	1	2	3	4	5
Pontos de Entrega (p)	1	0	0	0	1	0	
	2	0	1	0	0	0	
	3	0	1	0	0	0	
	4	1	0	0	0	0	
	5	1	0	0	0	0	
	6	0	1	0	0	0	
	7	0	0	0	1	0	
	8	0	0	0	1	0	
	9	0	0	0	1	0	
	10	0	0	0	1	0	

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 19, é possível visualizar a solução ótima para o problema como um todo, unindo-se o elo de roteirização ao elo de alocação. Em suma, foram utilizadas 2 rotas e 3 Centros Operacionais para o atendimento dos 10 Pontos de Entrega.

Figura 19 - Roteirização e alocação resultantes na solução do problema fictício



Fonte: Elaborado pelo autor

Além dos roteiros e alocações, outro dado importante a ser visualizado na solução encontrada é o número de pacotes encomendado por cada Centro Operacional para atendimento exato das demandas dos Pontos de Entrega, apresentado na Tabela 14. Importante ressaltar que as demandas encontradas respeitam as capacidades dos veículos utilizados em cada rota: tipo 1 na rota 3 e tipo 2 na rota 5.

Tabela 14 - Valores resultantes na variável e

		Rotas					
		$e(i,r)$	1	2	3	4	5
Centros Op.	1	0	0	0	0	0	70
	2	0	0	100	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	220
	5	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor

Finalmente, a solução ótima encontrada resulta em custo total de R\$ 307. A relação dos custos incorridos em cada uma das parcelas da Função Objetivo pode ser encontrada na Tabela 15.

Tabela 15 - Custos totais encontrados pela solução ótima

Custos Resultantes	Valor (R\$)
Frete Variável	R\$ 42
Custo Fixo Veículos	R\$ 20
Custo Utilização dos CO	R\$ 90
Custo Alocação PE	R\$ 156
TOTAL	R\$ 307

Fonte: Elaborado pelo autor

8. RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo, foram estudados e implementados os métodos para a resolução do problema em questão, de acordo com a modelagem desenvolvida no Capítulo 7 e os dados levantados como descrito no Capítulo 6.

O próximo passo foi a análise de sensibilidade computacional do problema. Tendo em vista a escala e caracterização do problema como NP-*hard*, a resolução exata é limitada por capacidade computacional e excessivo tempo de processamento. Dessa forma, foram conduzidos testes para analisar o tempo e capacidade de processamento conforme varia o tamanho dos parâmetros.

Por fim, dada a limitação sobre a obtenção da resolução exata, foi construída uma heurística com o intuito de chegar a uma solução com boa qualidade, em tempo computacional reduzido.

8.1. Resolução Exata do Problema

Com o objetivo de encontrar a solução exata para o problema, foi utilizado *software* IBM CPLEX OPL de versão 12.9.0, mantendo-se inalterados os padrões de resolução para o teste sequencial do modelo. O computador utilizado para processamento dos dados possui 8,00 GB de memória RAM e processador Intel ® Core™ i5-6300U CPU @ 2.40GHz 2.50GHz.

O problema real possui 30 Centros Operacionais candidatos, 4 tipos de veículos e 398 Pontos de Entrega a serem atendidos. No entanto, pela caracterização do problema como NP-*Hard*, não foi possível para o *software* encontrar a solução ótima do modelo em tempo hábil.

Por este motivo, e com o objetivo adicional de testar a performance do modelo, foram desenvolvidos 18 testes, inserindo os dados reais do problema de forma progressiva. Os testes de tempo computacional de resolução consistiram na resolução de recortes no tamanho dos conjuntos de elementos do problema real, e foram feitos sem nenhum julgamento prévio, apenas com base no ordenamento dos dados recebidos. Os resultados foram compilados na Tabela 16 para melhor visualização.

Tabela 16 - Resultados dos testes computacionais da modelagem do problema, com a utilização de dados reais

Número do teste	Quantidade de Centros Operacionais candidatos	Quantidade de Pontos de Entrega	Quantidade de tipos de veículos candidatos	Número total de variáveis	Tempo de CPU (segundos)
1	5	25	2	536	3,7
2	5	25	3	721	4,5
3	5	25	4	906	5,1
4	5	50	4	1031	8,2
5	10	50	3	4291	10,1
6	10	75	3	4541	88,9
7	10	25	4	5261	8,4
8	10	30	4	5311	12,9
9	10	40	4	5411	16,2
10	10	50	4	5511	16,2
11	10	75	4	5761	69,1
12	15	75	3	12961	237,6
13	15	100	3	13336	61,4
14	15	50	4	16441	32,2
15	15	75	4	16816	868,9
16	15	100	4	17191	890,8
17	15	125	4	17566	2220,8
18	15	150	4	17941	>57600,0

Fonte: Elaborado pelo autor

Os problemas inseridos no *software* e apresentados na Tabela 16 foram em primeiro lugar selecionados com o critério de mínima factibilidade. Além disto, buscou-se variar o tamanho dos 3 principais conjuntos de elementos do problema de forma independente: os Centros Operacionais, Pontos de entrega e Tipos de Veículos; de forma a testar como o tempo computacional varia de acordo com a variação do tamanho dos conjuntos.

É importante notar que o comportamento do tempo computacional do problema é condizente com a caracterização do problema como *NP-hard*, uma vez que o tempo computacional torna-se impraticável com o aumento do tamanho dos conjuntos de elementos em direção ao tamanho real do problema. A partir de certo tamanho de problema, ainda que com tamanho muito menor que o problema real, o tempo computacional de resolução aumenta de forma abrupta.

É possível concluir que o tempo de processamento tende a crescer, de forma geral, de forma similar a uma curva exponencial em relação ao número de variáveis em processamento no

problema, como também é observado por Papadimitriou e Steiglitz (1998) para problemas com a caracterização de NP-hard. O número de variáveis, por sua vez, cresce de forma diferente em relação às diferentes variações de tamanho dos conjuntos apresentados no problema. Esta relação é facilmente visualizada entre os problemas 2, 3, 4 e 10, que foram reapresentados e analisados na Tabela 17, onde compara-se a variação percentual entre o tamanho do conjunto de elementos modificado e o número de variáveis total.

Tabela 17 – Recorte e análise dos resultados dos testes computacionais

Número do teste	Quantidade de Centros Operacionais candidatos	Quantidade de Pontos de Entrega	Quantidade de tipos de veículos candidatos	Variação tamanho do conjunto em destaque(%)	Número total de variáveis	Variação número variáveis total (%)
2	5	25	3	-	721	-
3	5	25	4	33%	906	26%
4	5	50	4	100%	1031	14%
10	10	50	4	100%	5511	435%

Fonte: Elaborado pelo autor com dados da Tabela 16

A partir da análise, é possível verificar que o conjunto de elementos que causa maior aumento no número de variáveis no problema em resolução é a quantidade de Centros Operacionais candidatos. É claro que a proporção visualizada na análise não é constante, já que o tamanho de outros conjuntos interfere na proporção; mas é possível observar que, para ordens de grandeza comparáveis ao tamanho real do problema, a variação que a mudança no número de COs causa no número de variáveis total é maior que o restante dos conjuntos.

A relação torna-se intuitiva quando se recorda que os Centros Operacionais têm relevância central no problema, e por isso, trazem complexidade a ele. Os COs são comuns aos 2 elos da cadeia de distribuição, e interferem tanto no problema de roteirização quanto de localização e alocação. É possível inferir, portanto, que o fator que mais aumenta o tempo computacional de resolução do problema exato é o número de Centros Operacionais candidatos. Em consequência, uma possível mitigação do tempo computacional seria a priorização e pré-seleção de Centros Operacionais candidatos como entrada para o modelo.

No entanto, a relação de aumento do número de variáveis e tempo computacional nem sempre é tão previsível. A relação pode ser observada entre os problemas 11 a 15 da Tabela 16. É possível observar que o tempo computacional cresce conforme o número de variáveis cresce entre os problemas 11 e 12. No entanto, o tempo decresce até o problema 14, e volta a subir acentuadamente no problema 15. Novamente, a característica imprevisível do tempo

computacional é condizente com a classificação de NP-*hard*; além disso, é difícil de mensurar quanto tempo levará para que o *software* resolva um determinado problema.

8.2. Formulação da Heurística Construtiva

Uma vez que a resolução exata do problema de dimensões reais torna-se impraticável em questão de tempo de processamento, foi decidido partir para metodologias com a utilização de heurísticas construtivas. A partir da abordagem do problema de forma fragmentada e sequencial, busca-se chegar em soluções aliando boa qualidade e reduzido tempo e esforço de implementação, quando comparando-se à solução exata. Sendo assim, a presente seção se dedica ao desenvolvimento e testes da abordagem heurística.

Segundo Silver (2004), uma heurística construtiva trata-se de um tipo de algoritmo para resolução de problemas que constrói uma solução a partir de uma solução vazia, por meio de um sequenciamento de tomadas de decisão que estende gradativamente seu escopo. Como todo método heurístico, a metodologia não garante encontrar a solução ótima, mas busca oferecer resultados de boa qualidade em um tempo computacional aceitável.

Tratando-se de métodos sequenciais, é necessário definir o ordenamento da tomada de decisão dentro do algoritmo. O problema tratado pode ser dividido em 2 grandes etapas:

1. Problema de localização e alocação: devem ser escolhidos os Centros Operacionais a serem utilizados e os Pontos de Entrega a serem servidos por cada um deles.
2. Problema de roteirização: tendo em vista os Centros Operacionais e as áreas de demanda que atenderão, devem ser determinadas quais serão as rotas de abastecimento e quais tipos de veículos farão cada percurso.

Segundo Srivastava e Benton (1990), métodos sequenciais como o tratado podem resultar em soluções de boa qualidade quando se soluciona primeiro o problema de localização e alocação, seguido do problema de roteirização; ordenamento seguido na heurística proposta por este trabalho.

Com o objetivo de buscar um método mais adequado e preciso, foram propostas neste trabalho duas diferentes metodologias heurísticas construtivas. Como dentro entre os algoritmos propostos a maior diferença se dá na decisão de Localização, serão explicitadas as

diferenças entre as heurísticas apenas nesta etapa. Os algoritmos para as decisões específicas de Alocação e de Roteirização são os mesmos para ambas alternativas de heurísticas.

8.2.1. Problema de Localização

A escolha da localização e o número de Centros Operacionais a serem utilizados depende fortemente de sua proximidade com os Pontos de Entrega que devem ser atendidos. Sendo assim, a definição das localidades abertas deve levar em conta a matriz de custos com alocação de Pontos de Entrega, embora ainda não seja feita nesta fase a alocação definitiva. Para a tomada desta importante decisão, são propostas duas diferentes adaptações de heurísticas existentes.

i. Heurística 1: Algoritmo da Centralidade adaptado

O algoritmo da Centralidade, utilizado por Moshref-Javadi e Lee (2016), propõe realizar a decisão de localização mensurando-se a centralidade dos depósitos como fator para decidir a localização daqueles que serão abertos. O indicador é calculado em função das distâncias do depósito a cada cliente, e permite avaliar quais os COs mais bem localizados.

No problema tratado, o fator de distância é embutido no cálculo do Custo de Alocação de um Ponto de Entrega em relação a um determinado Centro Operacional. O dado leva em conta os custos estimados de atendimento da demanda de um determinado PE pelo CO em questão, sendo proporcional à distância, mas também à demanda. Por similaridade na lógica, foi decidido utilizar-se do custo como substituto à distância, adaptando a decisão para um indicador que pondera a demanda além da distância. O coeficiente de centralidade adaptado é calculado da seguinte forma, para cada CO:

$$Centralidade_{CO} = \sum_{j \in PE} \frac{1}{1 + \text{Custo Alocação}_{CO,j}}$$

O coeficiente por si só, no entanto, não garante a relevante ponderação sobre os custos de utilização de cada depósito. No caso do problema em questão, os custos com utilização possuem importantes variações. Em primeiro lugar, este é um custo que pode flutuar de acordo com os preços de aluguel, contrato com fornecedor, manutenção do estabelecimento e salários da localidade; fatores que possuem relevante variabilidade entre localidades mais urbanas e mais rurais, por exemplo. Em segundo lugar, os Centros Operacionais atualmente utilizados são em

boa parte terceirizados, portanto podem possuir relevantes diferenças de custos entre si, e em comparação à utilização de lojas físicas da Lojas Americanas como Centros Operacionais.

Giordano (2016) propôs uma adaptação da heurística para uma problemática similar, obtendo bons resultados. O algoritmo utilizado determina, a cada iteração, quais são os depósitos mais bem localizados de acordo com o coeficiente, decidindo sempre pela abertura do depósito que ofereceu valor superior. O autor, então, analisou cenários com a abertura de 1 até todos os depósitos concomitantemente.

Para a contabilização de custos, a proposta de Giordano foi utilizar-se de um coeficiente para complementar a métrica da Centralidade. O coeficiente utilizado leva em conta a proporção entre os custos de utilização de cada depósito e os custos totais de distribuição atuais do escopo de seu problema. Na falta do dado de custos totais atuais, o custo de utilização será comparado à soma de custos de utilização de todos os Centros Operacionais do escopo atual. Portanto, o coeficiente de ajuste é calculado com a seguinte fórmula:

$$CoefAjuste_{CO} = \frac{Custo\ de\ utilização\ do\ CO}{Soma\ do\ Custo\ de\ utilização\ de\ todos\ os\ CO}$$

O coeficiente de ajuste, portanto, servirá como uma ponderação ao coeficiente de Centralidade, de modo que se aumente a probabilidade de escolha de Centros Operacionais com menores custos de utilização. A formulação final utilizada na heurística como métrica resulta em:

$$Coeficiente\ de\ Abertura_{CO} = Centralidade_{CO}(1 - CoefAjuste_{CO})$$

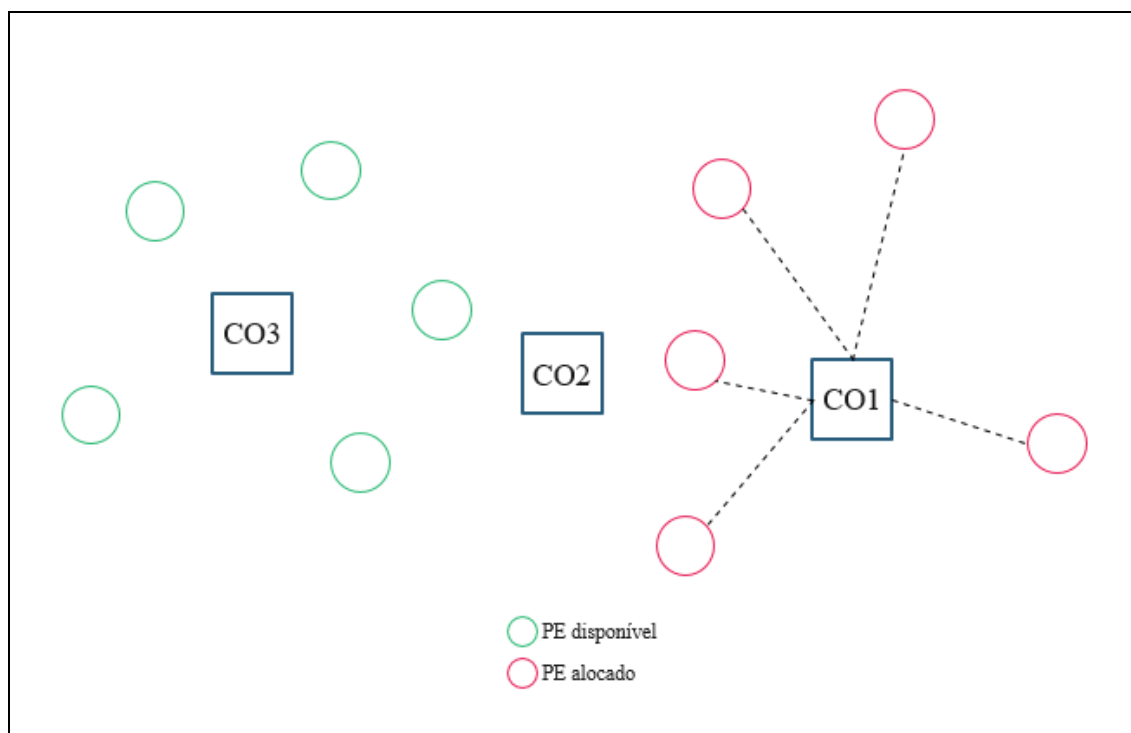
Sendo assim, a interpretação do coeficiente ocorre de modo que, quanto maior o coeficiente, melhor a relação entre localização frente aos clientes e custos de utilização de cada Centro Operacional.

Há ainda uma nova adaptação proposta em relação algoritmo utilizado por Giordano. O coeficiente de Centralidade leva sempre em conta todos os clientes existentes para cada cálculo do indicador, mesmo quando alguns destes localizam-se muito distantes de um dado depósito. Sendo assim, apesar de estarem sendo contabilizados no coeficiente, muito provavelmente estes clientes não serão alocados a este depósito. Com o objetivo de ajustar esta distorção, introduziu-se uma divisão do algoritmo de abertura de Centros Operacionais em 2 partes dentro da heurística, como pode ser observado na descrição da heurística completa.

De maneira mais detalhada, na primeira utilização do método é criado um sub-algoritmo denominado Alocação Factível. O método, detalhado na Figura 21, cria uma alocação provisória, designando para cada novo CO aberto o maior número possível de Pontos de Entrega, até que sua capacidade seja ocupada por completo ou nenhum PE possa ser adicionado. Desta forma, em cada iteração, o coeficiente de centralidade é calculado apenas sobre os clientes ainda não alocados; de modo que, com exceção do primeiro CO, que terá o indicador calculado levando todos os PE em conta, os demais CO terão o coeficiente calculado levando apenas os PE disponíveis em conta. Esta iteração é então feita até que não haja mais PE disponíveis.

Esta modificação é realizada para evitar situações em que são alocados COs mais próximos, onde o coeficiente de centralidade é influenciado pelos mesmos PEs para ambos os COs. A situação é ilustrada na Figura 20, onde o exemplo demonstra que a abertura do CO1 não deveria ser sucedida pela abertura do CO2, mas sim do CO3, já que os Pontos de Entrega que o posicionavam bem já foram designados.

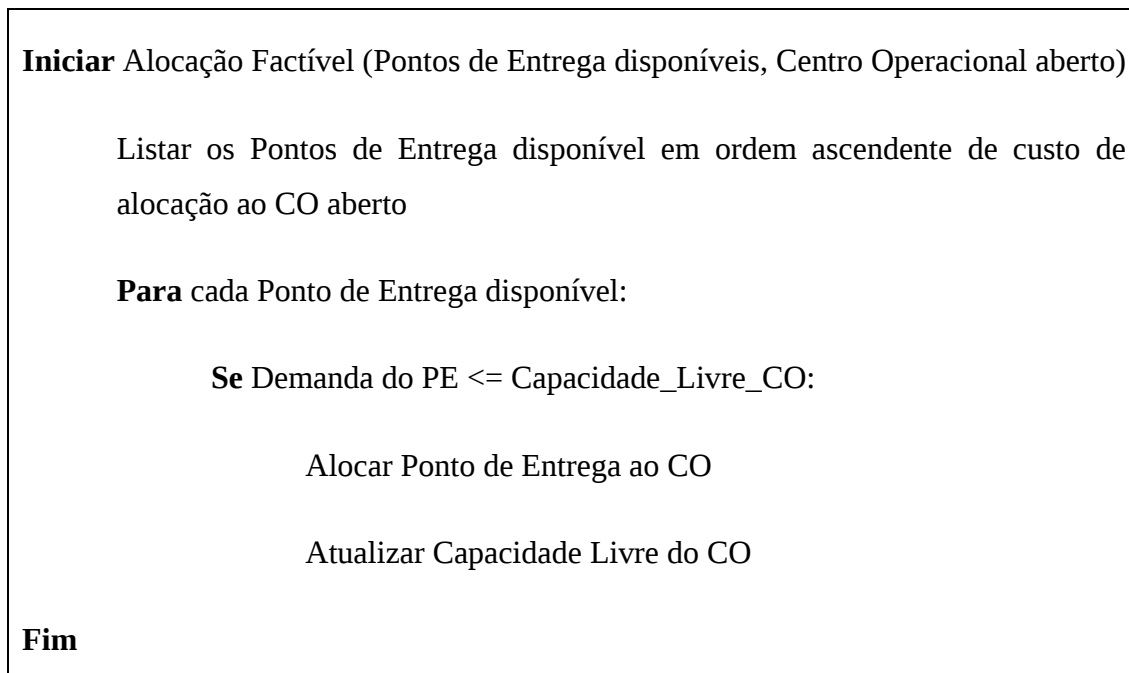
Figura 20 - Ilustração de caso de ajuste no cálculo da centralidade



Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, apresenta-se na Figura 21 a formulação da função de alocação factível.

Figura 21 - Formulação da heurística para primeira alocação factível de Pontos de Entrega



Fonte: Elaborado pelo autor

A segunda utilização do método da centralidade é feita para novas iterações da heurística, quando busca-se refinar a menor solução factível testando a abertura de novos Centros Operacionais antes não escolhidos. A nova fase iterativa faz uma comparação de cenários abrindo os CO disponíveis um a um, em ordem decrescente de Coeficiente de Abertura, mantendo no cenário escolhido aquele que, quando inseridos, obtiveram uma melhoria de custos em relação ao melhor cenário anterior. Nesta fase, o indicador da Centralidade será sempre calculada sobre todos os Pontos de Entrega existentes.

ii. Heurística 2: Algoritmo Míope Modificado

O algoritmo Míope é uma heurística comumente utilizada para a resolução do problema clássico de localização das p -medianas, onde devem ser escolhidos as p facilidades abertas para o atendimento completo de um dado conjunto de clientes, baseando-se exclusivamente em uma matriz de custos entre depósitos e clientes, comumente proporcional à distância e ponderada pela demanda de cada cliente. O algoritmo propõe abrir depósitos iterativamente com base na menor somatória de custos de alocação por facilidade, até atingir o número p desejado.

Dzator e Dzator (2015) propuseram uma modificação que trouxe bons resultados no algoritmo indicado por Daskin (1995), e foi explorada no presente estudo. O método original possui uma limitação, sugerida por seu nome, pois não enxerga o impacto da tomada de decisão

para além da iteração atual; isto porque a escolha do melhor depósito em cada iteração baseia-se exclusivamente no menor custo apresentado por depósito no instante da escolha, não permitindo *feedbacks* da decisão e reavaliações.

Para mitigar este efeito e tornar a escolha do primeiro depósito mais otimizada, a mudança proposta por Dzator e Dzator (2015) consistiu na desconsideração de uma parcela dos maiores valores na matriz de custos na primeira iteração. A lógica por trás da modificação está no fato de que a primeira escolha não precisa minimizar o custo com a alocação incluindo os clientes mais distantes, pois provavelmente ele será alocado a um depósito aberto em uma futura iteração de qualquer maneira. Importante notar que, durante as demais iterações, este efeito já era parcialmente ponderado pelo algoritmo original, pois ele atualiza a matriz de custos em cada iteração levando em conta as decisões anteriores. A partir de cada depósito escolhido, o custo de alocação máximo de um dado cliente passa a ser no máximo igual ao custo de alocação deste cliente ao depósito escolhido.

Assim como na Heurística 1, no entanto, o algoritmo não considera os custos fixos de utilização dos Centros Operacionais. Para que seja levado em conta, foi feita uma breve modificação na heurística: o custo de utilização foi adicionado à soma dos custos de alocação para cada CO, no momento em que se busca o menor custo por CO. A fórmula final considerada para cada decisão de abertura de um novo CO é apresentada a seguir:

$$Custo\ de\ Abertura_{CO} = Custo\ de\ Utilização_{CO} + \sum_{j \in PE} Matriz\ de\ Custo_{CO,j}$$

De forma resumida, o algoritmo Míope modificado funciona da seguinte forma:

- Para a primeira iteração, são desconsiderados os p maiores valores de cada depósito na matriz de custo;

Em cada iteração, é aberto um depósito e atualiza-se a matriz de custos até atingir o número p desejado de facilidades abertas:

- É escolhido o depósito que representa o menor coeficiente de Custo de Abertura;
- A matriz de custos é atualizada determinando que o custo de alocação para cada Ponto de Entrega por cada Centro Operacional disponível não deve ultrapassar o

valor de custo do depósito recém-aberto, já que teoricamente seria aquele o máximo custo incorrido para tal cliente.

Figura 22 - Formulação da heurística de abertura de COs

Iniciar Algoritmo Míope Modificado (p)

Para cada CO:

Excluir os $p.coef$ maiores custos de alocação

Abrir primeiro CO com menor soma de custos de alocação

Atualizar matriz de custos

Enquanto CO abertos $< p$:

Abrir CO com menor soma de custos de alocação

Atualizar matriz de custos

Fim

Fonte: Adaptado com base em Dzator e J. Dzator (2015)

Assim como ocorrido com o algoritmo da Centralidade, o algoritmo Míope somente responde à pergunta sobre qual o próximo melhor Centro Operacional a ser aberto. O próximo passo da resolução é entender quantos Centros Operacionais devem ser abertos, ou seja, definir o valor p associado aos menores custos. Para avançar nesta frente, foi utilizada uma estrutura de resolução semelhante à realizada na Heurística 1, porém não idêntica:

- Em um primeiro momento, foi utilizado o algoritmo de Alocação Factível, que realiza uma alocação provisória até que o menor problema factível seja encontrado;
- Em seguida, a heurística avança até o passo da roteirização e calcula os custos para o cenário atual;
- A heurística então realiza iterações, variando o valor p desde o menor valor factível até o valor W , onde todos os Centros Operacionais são abertos.

A fase iterativa de cenarizações é, portanto, diferente daquela realizada na Heurística 1, que testa iterativamente a inserção de cada CO não aberto em conjunto ao algoritmo da Alocação Factível. Na Heurística 2, são obrigatoriamente analisados cenários com número crescente de Centros Operacionais, buscando-se o número de Centros Operacionais abertos p que traz o cenário com menor custo total.

8.2.2. Problema de Alocação

A segunda etapa para a resolução heurística do problema é a decisão de alocação. Nesta fase, é proposto um algoritmo onde são desfeitas as alocações existentes, e é feita uma nova designação dos Pontos de Entrega a partir do cenário atual de Centros Operacionais abertos.

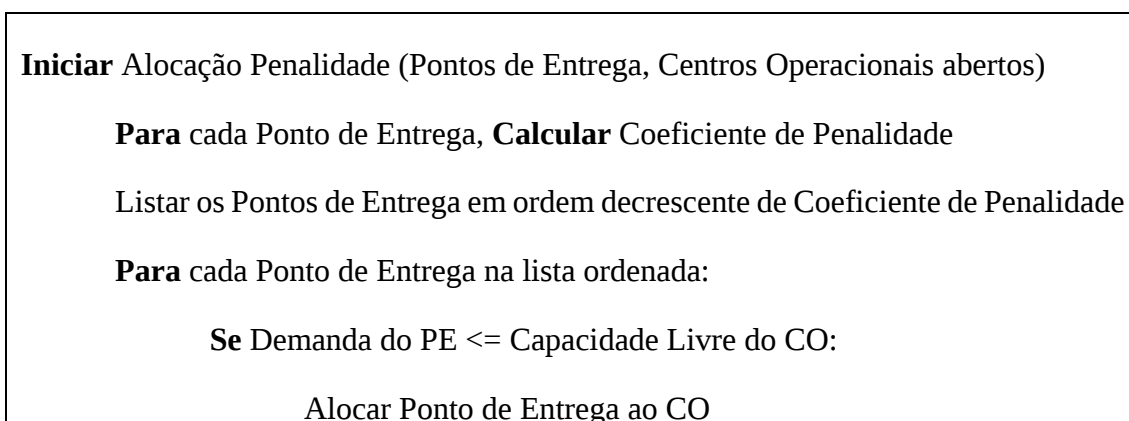
O problema em questão possui uma restrição em relação à capacidade de expedição de cada depósito: o número de pacotes demandado por cada Ponto de Entrega alocado a um determinado Centro Operacional, quando somado, não deve ultrapassar sua capacidade de expedição. Tendo em vista esta condição, esta parte do problema pode ser comparada ao clássico problema de transporte com restrição de capacidade, abordado de forma sistemática por Winston (2003). Em sua obra, são propostas 3 principais metodologias para a priorização de alocações a serem realizadas, buscando alcançar uma primeira solução factível de boa qualidade:

- Método do canto Noroeste;
- Método do Custo Mínimo;
- Método de Vogel.

Extensa pesquisa sobre os métodos, realizada por Glover *et al.* (1974), mostra que a utilização do método de Vogel obtém resultados mais próximos da solução ótima, portanto características deste método serão utilizadas na heurística deste trabalho.

O princípio por trás do método é a contabilização de uma penalidade fictícia pela não alocação de cada Ponto de Entrega ao Centro Operacional mais próximo. Desta forma, prioriza-se a alocação não pelo menor custo, mas pela diferença entre o menor custo e o segundo menor. O algoritmo é descrito de forma detalhada na Figura 23.

Figura 23 - Formulação da heurística de alocação definitiva dos Pontos de Entrega



Atualizar Capacidade Livre do CO

Fim

Fonte: Adaptado do método de Vogel (WINSTON, 2004)

Na prática, o algoritmo tende a priorizar a designação de Pontos de Entrega mais custosos ou a ressaltar aqueles que, se não alocados ao CO mais próximo, trarão um acréscimo mais relevante de custos. Já que os CO saturam conforme a designação de clientes, esse artifício ajuda a garantir que sejam alocados em primeiro lugar os Pontos de Entrega em situação mais crítica em relação aos demais, estejam eles mais distantes ou tenham custos de maior ordem de grandeza devido a grandes demandas, por exemplo.

8.2.3. Problema de Roteirização

Tendo determinados os Centros Operacionais abertos e as alocações dos Pontos de Entrega, é possível partir para a roteirização das entregas de abastecimento partindo do HUB aos Centros Operacionais. Os elementos a serem decididos nesta fase são: quais COs serão atendidos em cada rota, a ordem de atendimento dos COs dentro de uma rota e qual o tipo de veículo utilizado por cada rota.

Em seu trabalho, Solomon (1987) apresenta uma heurística de inserção sequencial para o roteamento de veículos. O primeiro passo é a inicialização da primeira rota. O autor apresenta três diferentes critérios para a inicialização de uma rota em uma heurística de inserção sequencial para roteamento com janela de tempo. Como duas entre três alternativas baseiam-se no tempo, variável não considerada no escopo deste trabalho, foi utilizado e adaptado para o contexto real o critério restante: a primeira rota é aberta a partir do Centro Operacional de maior distância ao HUB. Ronconi e Manguino (2016) e Giordano (2016) utilizaram-se deste mesmo critério, obtendo bons resultados.

Tendo a primeira rota iniciada, é possível partir para a etapa iterativa do algoritmo de Solomon (1987), onde os Centros Operacionais restantes serão roteirizados. Para decidir como cada CO será atendido por uma rota, serão avaliadas duas alternativas, escolhendo-se aquela que apresentar menor custo marginal:

1. Inserção do CO em uma determinada posição em uma rota existente
2. Inicialização de uma nova rota dedicada

Para a avaliação da primeira alternativa, deve ser encontrado o ponto ideal de inserção $c1$ de cada CO que minimiza os custos. Para tal, o cálculo será realizado da seguinte forma:

Seja $(i_0, i_1, i_2, i_3, \dots, i_n)$ uma rota em construção com $i_0 = i_n = 0$ e $(r_0, r_1, \dots, r_m)$ o conjunto de rotas existentes, a posição ideal de inserção do cliente u e o custo marginal para a inserção pode ser quantificado por

$$c_1(i, u, j, r) = \min[c_1(i_{p-1}, u, i_p, r)], \quad \text{para } p = 1, \dots, n \text{ e } r = 1, \dots, m$$

Sendo:

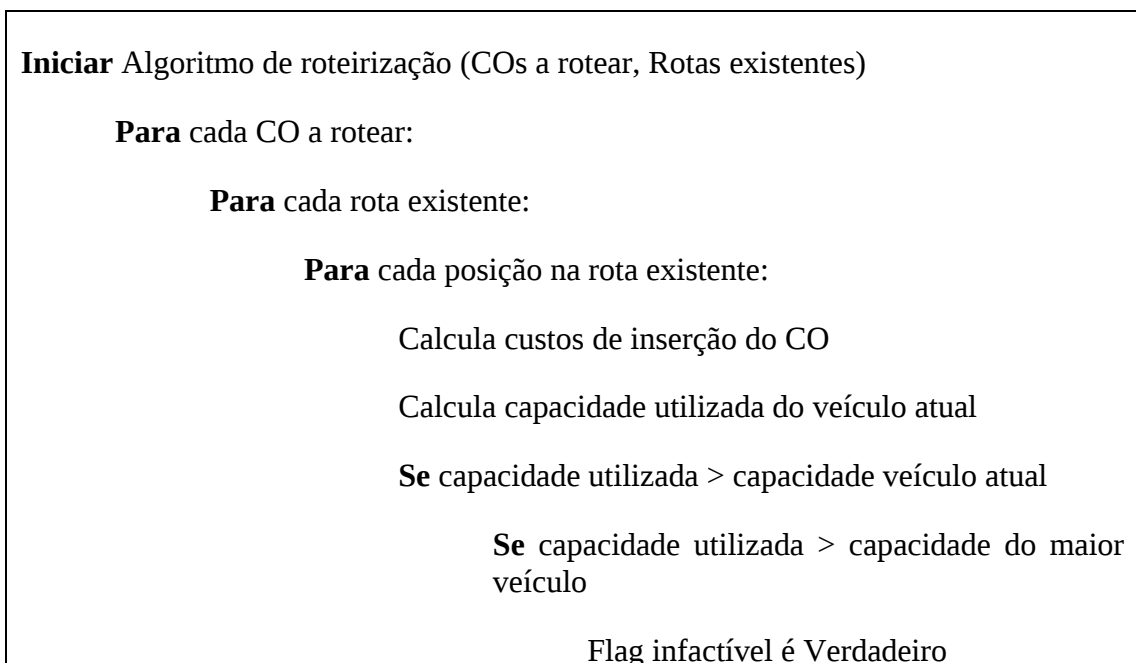
$$c_1(i, u, j, r) = \text{custo}(i_{p-1}, u, r) + \text{custo}(u, i_p, r) - \text{custo}(i_{p-1}, i_p, r)$$

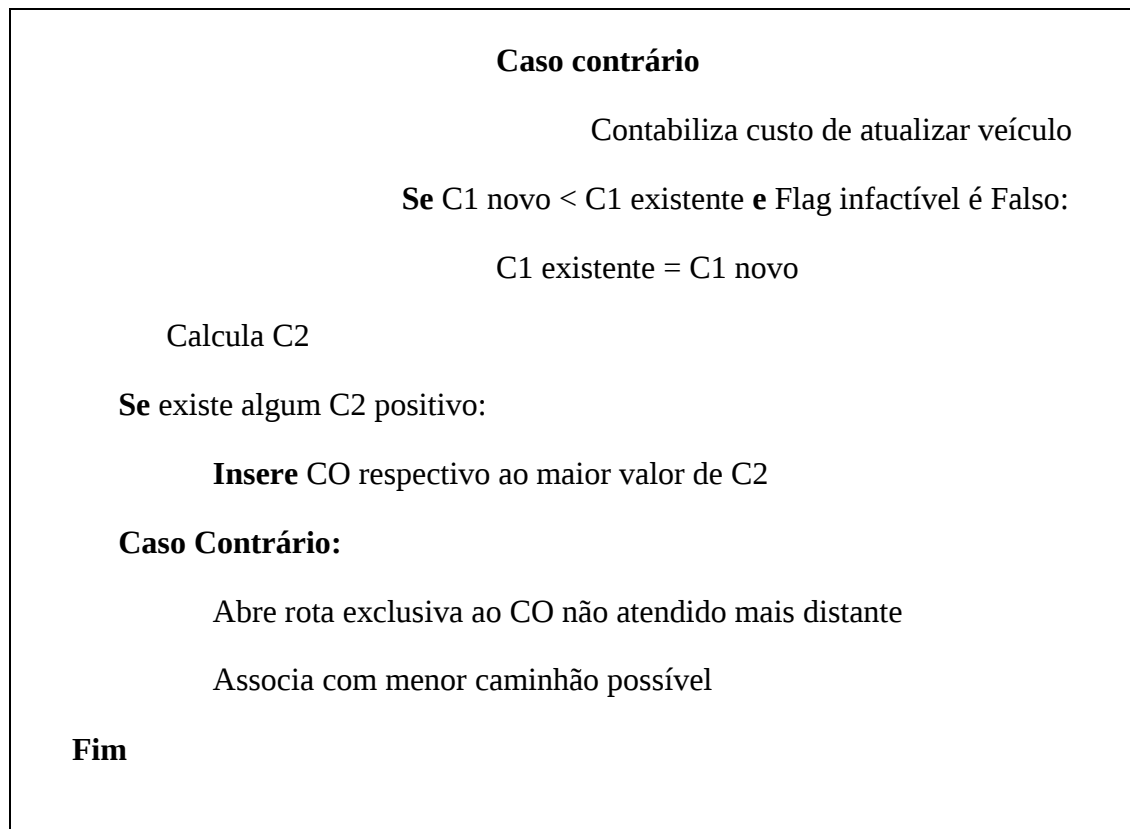
Enfim, calcula-se a diferença entre o custo de abertura de uma nova rota exclusiva e a melhor inserção $c1$ possível para o CO por

$$c_2(i, u, j, r) = \text{custo}(i_{p-1}, u, r) + \text{custo}(u, i_p, r) - \text{custo}(i_{p-1}, i_p, r)$$

Tendo sido calculado o valor do coeficiente $c2$ para cada cliente, insere-se na respectiva rota o cliente com o maior valor positivo do indicador. Caso não haja valor positivo de $c2$, é aberta nova rota com o CO não roteado mais distante do HUB. A heurística por completo pode ser visualizada na Figura 24.

Figura 24 - Formulação da heurística de roteirização de COs

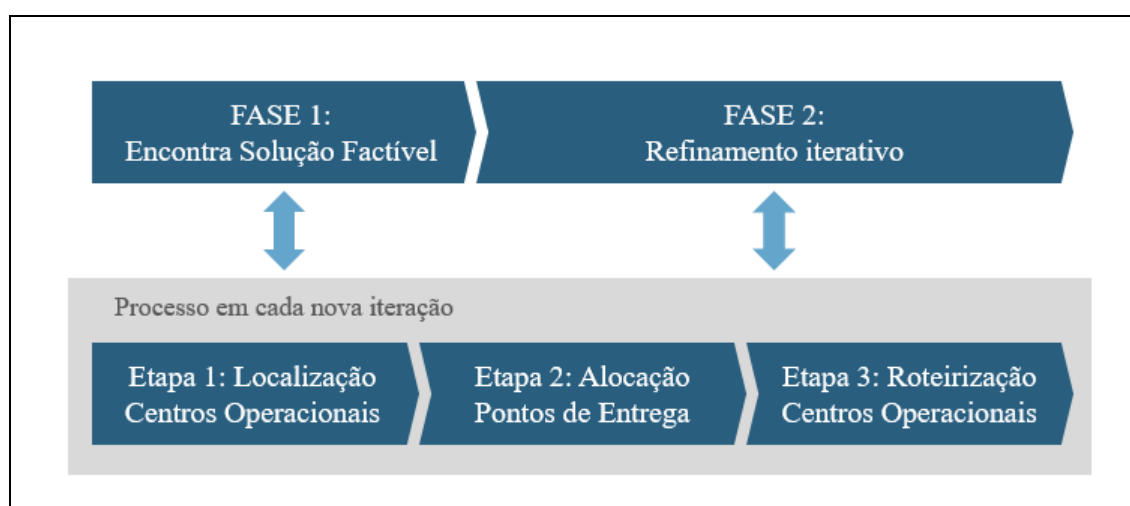




Fonte: Adaptado de Solomon (1987)

Em seguida, foi desenvolvida em estrutura de tópicos um resumo dos principais passos das Heurísticas construtivas completas. O processo geral explanado a seguir pode ser esquematizado na Figura 25.

Figura 25 - Processo geral das heurísticas apresentadas



Fonte: Elaborado pelo autor

FASE 1: Encontrar solução factível de boa qualidade

Etapa 1: Localizar Centros Operacionais

Heurística 1

- Calcular coeficiente de abertura (componentes centralidade e custos de utilização) com cada CO candidato, considerando apenas Pontos de Entrega não alocados;
- Abrir CO candidato com maior coeficiente de abertura;
- Para último CO aberto, alocar Pontos de Entrega que capacidade de expedição suportar, priorizando menor custo de alocação;
- Se restaram Pontos de Entrega desalocados, voltar ao primeiro passo.

Heurística 2

- Para cada CO, desconsiderar um determinado número de PEs com maior custo de alocação, priorizando os Pontos de Entrega mais próximos;
- Abrir CO candidato com menor soma total de custos de alocação;
- Atualizar matriz de custos determinando que custo de alocação para cada PE deve no máximo igual aos custos relacionados ao CO recém-aberto;
- Para último CO aberto, alocar Pontos de Entrega que capacidade de expedição suportar, priorizando menor custo de alocação;
- Repetir até que o número de COs abertos seja igual ao valor p da iteração, ou até que a primeira solução factível seja encontrada.

Etapa 2: Alocar Pontos de Entrega buscando minimizar custos.

- Desfazendo as alocações da etapa 1.1, calcular coeficiente de penalidade de cada Ponto de Entrega disponível aos COs abertos, medindo a diferença de custo gerada pela não alocação de cada PE ao CO mais próximo em relação ao segundo CO mais próximo;
- Em ordem decrescente de coeficiente de penalidade, alocar os pontos de entrega ao CO disponível que apresentar menor custo de alocação. Como cada CO possui uma capacidade de expedição, esta não pode ser excedida pelas remessas demandadas pelos clientes alocados.

Etapa 3: Roteirizar Centros Operacionais.

Etapa 3.1: Inicializar primeira rota.

- Se não há rotas existentes, abre primeira rota com o Centro Operacional não atendido por rotas mais distante do HUB.

Etapa 3.2: Roteirizar cada Centro Operacional aberto e não roteirizado.

- Calcular custo marginal de inserção em cada rota disponível, incluindo custos adicionais com mudança para veículos de maior capacidade. Reter opção de rota com menor custo marginal;
- Calcular custo de abertura de nova rota dedicada ao Centro Operacional em questão;
- Decidir pela opção de menor custo e implementar roteiro.

FASE 2: Buscar refinamento após primeira solução encontrada

Fazer para todos os COs ainda disponíveis

- Abrir próximo CO com maior coeficiente de abertura, considerando novamente todos os Pontos de Entrega;
- Refazer alocação de todos os clientes aos COs (Etapa 2);
- Refazer roteirização (Etapa 3);
- Calcular custos do novo cenário e comparar aos custos do cenário anterior, mantendo a solução de menor custo total.

Segue formulação completa da Heurística 1.

Figura 26 - Formulação conceitual completa da Heurística 1

Iniciar Heurística 1

Enquanto Solução Factível é falso:

Calcula Coeficientes de Abertura com COs disponíveis e Pontos de Entrega não-alocados

Ativa Centro Operacional com maior valor Coef_Abertura

Executa Alocação_Factível de Pontos de Entrega

Se lista de Pontos de Entrega disponíveis é vazio, Solução Factível é verdadeiro

Executa Alocação Penalidade

Abre rota exclusiva com CO mais distante do HUB

Enquanto COs a rotear é diferente de vazio:

Executa Roteirização para cada CO aberto e não atendido

Fazer para cada CO disponível:

Calcula Coeficiente de Abertura com COs disponíveis e todos os Pontos de Entrega

Ativa CO com maior Coeficiente de Abertura

Executa Alocação dos Pontos de Entrega com todos os COs e PEs

Executa Roteirização para novo CO

Se custos cenário novo < custos melhor cenário:

Atualiza Solução Ótima

Fim

Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, é apresentada a formulação completa da Heurística 2, na Figura 27.

Figura 27 - Formulação conceitual completa da Heurística 2

Iniciar Heurística 2

Enquanto Solução Factível é falso:

Executa Algoritmo Míope

Executa Alocação_Factível de Pontos de Entrega

Se lista de Pontos de Entrega disponíveis é vazio, Solução Factível é verdadeiro

Enquanto $p < |W|$ ou critério de parada:

Executa Alocação Penalidade

Abre rota exclusiva com CO mais distante do HUB

Enquanto COs a rotear é diferente de vazio:

Executa Roteirização para cada CO aberto e não atendido

Se custos cenário novo < custos melhor cenário:

Atualiza Solução Ótima

Fim

Fonte: Elaborado pelo autor

8.3. Validação das heurísticas

Para garantir a conformidade de comportamento dos métodos heurísticos propostos segundo a proposta, foi realizada uma série de testes em problemas reduzidos, validando o funcionamento dos mecanismos das heurísticas e permitindo um refinamento ao longo do processo de implementação.

Em seguida, com o objetivo de verificar a eficácia dos métodos em relação ao problema real, foram desenvolvidas simulações onde compara-se o resultado de ambas as heurísticas à solução dada pela resolução exata de um recorte do problema real. É importante notar que, assim como realizado na Tabela 16 - Resultados dos testes computacionais da modelagem do problema, com a utilização de dados reais, a Tabela 16, os cenários selecionados do problema real foram escolhidos sem qualquer julgamento prévio, apenas levando em conta o ordenamento dos dados recebidos pela empresa e garantindo inserir entradas que permitissem soluções factíveis. Os resultados das simulações podem ser observados na Tabela 18.

Tabela 18 - Validação e análise de resultados das heurísticas propostas

Quantidade de COs candidatos	Quantidade de PEs a atender	Tipos de veículos candidatos	Heurística 1- Diferença em relação ao ótimo (%)	Heurística 2- Diferença em relação ao ótimo (%)
10	50	2	30%	54%
10	70	2	7%	23%

10	90	2	9%	18%
10	50	4	29%	54%
10	70	4	8%	22%
10	90	4	14%	24%
10	100	4	18%	17%
15	50	4	29%	54%
15	70	4	7%	31%
15	90	4	18%	28%
15	100	4	35%	40%
15	150	4	20%	3%
20	70	4	8%	31%
20	90	4	19%	28%

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos testes realizados com ambas as heurísticas, observa-se que a Heurística 1 obteve, no geral, resultados mais próximos à solução exata e de forma mais consistente que a Heurística 2. A média da diferença entre o método e a solução ótima dos problemas reduzidos foi de 18%, enquanto a diferença da Heurística 2 foi de 31%.

No entanto, é notável a variabilidade e o valor máximo encontrado de 35%. É importante ressaltar que é normal que métodos heurísticos possuam certa variabilidade, já que a solução por eles encontrada dificilmente reside no valor ótimo global do problema. Apesar de diversas vantagens, as heurísticas por vezes possuem limitações e requerem um processo iterativo de calibrações durante seu desenvolvimento.

Para fins de praticidade, no entanto, o método é a alternativa mais viável disponível para a resolução do problema enfrentado, uma vez que a resolução exata é improvável de ser obtida em tempo computacional razoável, uma vez que testes com recortes do problema real já foram impraticáveis.

Por fim, é possível concluir que a Heurística 1, que se utiliza da medida da Centralidade como critério para localização dos melhores Centros Operacionais, é o método de melhor performance entre os disponíveis. Sendo assim, prosseguiu-se com sua adoção como ferramenta padrão para a geração de resultados para este trabalho.

9. ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo tem como objetivo implementar a metodologia de resolução recomendada, expor seus resultados e realizar uma análise profunda de suas implicações, tanto em relação à solução atual da empresa quanto às possíveis variações no cenário base. Além disso, uma das questões chave que a resolução deste problema buscou responder é o número de Lojas da Lojas Americanas que deverá ser adaptada como Centros Operacionais.

Para tal, em primeiro lugar, foi gerada pela heurística proposta e explorada detalhadamente a nova configuração proposta por esta metodologia. Esta solução será comparada ao cenário de circunstâncias atuais, mas também frente a cenários alternativos hipotéticos, através de análises de sensibilidade frente alguns dos principais parâmetros.

9.1. Implementação da heurística

Tendo sido decidida a utilização da Heurística 1 como solução praticável de melhor qualidade, foi possível avançar à implementação do método para o problema real completo. Assim como para os testes de performance das heurísticas realizadas no Capítulo 8.3, o programa da linguagem foi escrito em linguagem Python e implementado no ambiente Spyder (Python 3.7). Segundo o site do *software*, a linguagem e o ambiente são largamente utilizados por cientistas de dados, cientistas e engenheiros para análises de dados das mais diferentes características. (Spyder, 2019)

Para exemplificar como foi estruturada a base de dados de entrada no programa, uma amostra das tabelas de dados é disponibilizada no APÊNDICE E. Os dados são organizados da seguinte forma:

- Matriz de Distâncias entre Centros Operacionais;
- Matriz de Custo de Alocação dos Pontos de Entrega aos Centros Operacionais;
- Parâmetros de Custo de Utilização e Capacidade para os Centros Operacionais;
- Parâmetros de Capacidade, Custo Fixo diário e Custo Variável por km de cada tipo de veículo;
- Demanda de cada Ponto de Entrega.

9.2. Solução recomendada

Utilizando-se da Heurística 1 já descrita e implementada, foi possível encontrar uma solução com menores custos que o cenário atual da empresa para o problema proposto de localização e roteirização dos Centros Operacionais a serem ativados, alocação dos Pontos de Entrega. Já que solução gerada pela Heurística 2 foi pior que a solução do cenário atual, e por isso não foi apresentada como um cenário alternativo.

É importante lembrar, como descrito no Capítulo 6, que os dados utilizados para o cálculo dos custos logísticos efetivos da empresa foram obtidos através de uma instância inspirada pela situação real com aplicação dos dados utilizados por este trabalho. Os valores verdadeiros não puderam ser utilizados diretamente por questões de confidencialidade.

Como é possível observar na Tabela 19, a solução proposta com a utilização da Heurística 1 obteve uma solução com 4,4% de economia de custos em relação à solução simulada com as instâncias reais.

A principal economia se deve ao menor custo de frete variável de distribuição alcançado, que compensa os maiores custos de alocação obtidos. Como os veículos utilizados pelos 2 cenários são praticamente os mesmos, esta grande diferença no frete se deve à localização e roteirização de COs menos distantes entre si, incorreu em menores custos de transporte para seu abastecimento; ao mesmo tempo em que esta maior concentração de COs acarretou maiores distâncias aos Pontos de Entrega, aumentando os custos de alocação totais.

Os custos fixos de utilização dos Centros Operacionais e dos veículos, por sua vez, foram similares em relação aos 2 cenários apresentados, o que significa que as dimensões das capacidades dos veículos e dos depósitos utilizados são parecidas.

Tabela 19- Comparação de custos logísticos da solução com a simulação com instâncias baseadas na configuração real

Tipo de parcela de custo	Custos logísticos atuais (R\$)	Custos da solução proposta (R\$)	Diferença de custos (%)
Frete variável	22.853	16.055	-30%
Custo Fixo Veículo	2.473	2.469	0%
Custo de Utilização	14.904	14.273	-4%
Custo de Alocação	38.179	42.131	10%

CUSTO TOTAL	78.409	74.929	-4%
-------------	--------	--------	-----

Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir, será melhor detalhada a configuração obtida com a utilização da Heurística 1. Recordando as etapas da heurística, a primeira decisão tomada é a localização dos Centros Operacionais. A partir da decisão de quais COs devem ser abertos, o algoritmo define qual a melhor alocação dos Pontos de Entrega. Estas duas etapas geram os insumos necessários para realizar, por fim, a roteirização dos COs.

A solução gerada pela heurística promoveu a ativação de 7 Centros Operacionais, e uma alocação conforme sua proximidade com os Pontos de Entrega, respeitando-se a capacidade dos Centros Operacionais. A alocação final sugerida pode ser visualizada na Tabela 20.

Tabela 20 – Alocação de Pontos de Entrega aos COs ativos na solução recomendada (tabela completa disponível no APÊNDICE D)

C062	C374	C018	C110	C192	C094	C060
PE070	PE374	PE018	PE110	PE192	PE094	PE276
PE120	PE136	PE210	PE295	PE053	PE266	PE060
PE380	PE146	PE019	PE200	PE142	PE004	PE184
PE062	PE302	PE206	PE389	PE397	PE057	PE020
PE388	PE033	PE199	PE248	PE392	PE080	PE170
PE204	PE267	PE171	PE138	PE095	PE041	PE287
PE220	PE107	PE244	PE003	PE367	PE279	PE378
PE077	PE042	PE043	PE254	PE086	PE269	PE349
PE251	PE360	PE054	PE217	PE366	PE029	PE061
PE026	PE039	PE063	PE311	PE140	PE249	PE163
PE123		PE183	PE379	PE177	PE270	PE112
PE099		PE051	PE277	PE025	PE353	PE282
PE022		PE207	PE265	PE391	PE351	PE087
PE126		PE215	PE260	PE381	PE151	
PE261		PE361	PE124	PE030	PE363	
PE049		PE243	PE059	PE268	PE196	
PE354		PE307	PE259	PE113	PE036	
PE129		PE111	PE017	PE334	PE300	
PE375		PE263	PE084	PE289	PE131	
PE324		PE100	PE226	PE052	PE090	
PE387		PE250	PE016	PE069	PE306	
PE299		PE232		PE014	PE079	
PE085		PE186		PE167	PE071	
PE292		PE316		PE179	PE147	
PE055		PE371		PE168	PE023	
PE066		PE078		PE330	PE271	
PE377		PE385		PE173	PE373	
PE319		PE296		PE297	PE345	
PE231		PE288		PE365	PE290	
PE037		PE105		PE318	PE211	

PE333		PE013		PE083	PE154	
PE216		PE258		PE286	PE074	
PE075		PE257		PE035	PE148	
PE197		PE332		PE312	PE068	
PE012		PE212		PE132	PE161	
PE104		PE221		PE278	PE002	
PE067		PE314		PE187	PE310	
PE152		PE143		PE010	PE102	
PE256		PE189		PE117	PE383	
PE239		PE165		PE158	PE137	
PE224		PE328		PE304		
PE157		PE238		PE235		
PE172		PE209		PE358		
PE108		PE122		PE320		
PE178		PE313		PE230		
PE241		PE252		PE001		
PE145		PE262		PE082		
PE091		PE050		PE321		
PE040		PE284		PE335		
PE193		PE045		PE305		
PE031		PE038		PE169		
PE009		PE106		PE032		
PE338		PE398		PE073		
PE135		PE097		PE195		
PE089		PE213		PE240		
PE355		PE205		PE283		
PE393		PE006		PE339		
PE181		PE185		PE337		
PE119		PE174		PE325		
PE364		PE234		PE048		
PE386		PE322		PE223		
PE294		PE155		PE134		
PE046		PE064		PE156		
PE225		PE236		PE228		
PE275		PE394		PE176		
PE008		PE315		PE341		
PE202		PE342		PE255		
PE072		PE109		PE180		
PE190		PE317				
PE141		PE372				
PE384		PE182				
PE382		PE298				
PE327		PE350				
PE098		PE153				
PE246		PE293				
		PE150				
		...				

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Tabela 21, são apresentadas as demandas designadas para cada rota, calculadas de acordo com os COs abastecidos por ela. A demanda alocada a cada CO é variável chave para

todas as partes do problema, uma vez que interfere em praticamente todas as decisões ao longo do processo.

Tabela 21 - Demandas atendidas por cada rota criada pela solução recomendada

Rota	Rota 1	Rota 2	Rota 3
Demanda atendida	5875	2306	4412

Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo as informações sobre quais COs atendem à cada Ponto de Entrega, a última decisão tomada é a montagem das rotas que abastecem cada CO. A solução proposta pela heurística, apresentada na Tabela 22, propõe pela utilização de 3 rotas distintas para o abastecimento dos COs. Pode-se observar que o algoritmo identificou ser mais interessante utilizar menor quantidade de veículos, porém com grande capacidade, ao invés de realizar mais percursos com veículos menores.

Tabela 22 - Rotas e respectivos veículos na configuração recomendada

No. da Rota	Rota1	Rota2	Rota3
Tipo de Veículo	CARRETA	TRUCK	CARRETA
Nó 1	HUB	HUB	HUB
Nó 2	C374	C060	C094
Nó 3	C018	C192	C110
Nó 4	C062	HUB	HUB
Nó 5	HUB	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

É também importante comparar a solução proposta com a solução atual, apresentada na Tabela 23. Em relação ao cenário em execução, a recomendação de mudança envolve a utilização de um veículo de menor tamanho e menos custoso em relação ao atual, o que é possível graças a uma distribuição às duas outras rotas. Além disso, a recomendação possui uma configuração com 7 Centros Operacionais contra 6 na configuração atual.

Tabela 23 - Rotas e respectivos veículos baseados na solução utilizada pela empresa

No. da Rota	Rota1	Rota2	Rota3
Tipo de Veículo	CARRETA	CARRETA	CARRETA
Nó 1	HUB1	HUB1	HUB1
Nó 2	C276	C094	C210
Nó 3	C136	HUB1	C192
Nó 4	C070	-	HUB1
Nó 5	HUB1	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor com dados compartilhados pela empresa

Para o escopo da implementação, também é de suma importância verificar quais os Centros Operacionais são já existentes e quais serão abertos, lembrando que as propostas de novos Centros Operacionais tratam-se da utilização de Lojas Físicas da Lojas Americanas como CO. Esta relevância é justificada pelo motivo de que para que possa ocorrer a implementação do cenário recomendado deverão ser realizados ajustes nas lojas físicas atuais e revistos contratos e os possíveis custos de rescisão com os Centros Operacionais atuais.

A partir dos dados apresentados na Tabela 24, é possível verificar que a solução gerada pela heurística é uma mudança relevante na estrutura logística atual, já que propõe a manutenção de apenas 2 Centros Operacionais e a utilização de 5 lojas da Lojas Americanas como CO.

Tabela 24 - Tipo dos Centros Operacionais abertos

Centros Operacionais recomendados	Existente/ Loja Física da LASA
Centro Operacional 018	Loja LASA
Centro Operacional 060	Loja LASA
Centro Operacional 062	Loja LASA
Centro Operacional 094	Existente
Centro Operacional 110	Loja LASA
Centro Operacional 192	Existente
Centro Operacional 374	Loja LASA

Em suma, sob a luz da análise proposta por esta metodologia, foi possível obter uma proposta de boa qualidade para o problema enfrentado, com claras vantagens de custo. Há, no entanto, considerações que devem ser analisadas como próximos passos antes da implementação final da solução, que serão sugeridas durante a conclusão do estudo.

9.3. Análise de sensibilidade

As sugestões de mudança propostas na Seção 9.2, no entanto, são realizadas com base em um cenário estático e determinístico. Os parâmetros apresentados são calculados a partir de dados médios e não levam em conta variações relevantes como a sazonalidade ao longo do ano, ou possíveis mutações em dados de custos. Torna-se necessário, portanto, levar em conta de alguma forma a dinamicidade de parâmetros como este na realidade de um sistema logístico complexo como o estudado.

Sendo assim, nesta seção foi realizada uma análise de sensibilidade do parâmetro de demanda dos Pontos de Entrega, com o objetivo de analisar o impacto nas soluções da metodologia proposta causado pela observação de cenários onde se aumenta ou diminui o valor do parâmetro.

O parâmetro da demanda é um conceito chave para o problema em estudo por este trabalho. Já que o atendimento da demanda é o motivo por trás do estabelecimento de um sistema de distribuição, o parâmetro é o principal vetor que rege a estruturação da cadeia de valor. No caso da B2W, em que o mercado de *e-commerce* e a empresa se encontram em acelerado crescimento de vendas, dada a forte tendência atual de migração do consumidor para o canal *online*.

Tendo a variação da demanda um grande potencial de impacto na configuração da cadeia logística, o parâmetro foi selecionado para uma análise mais minuciosa. Para tal, foi testado o comportamento das soluções de acordo com o incremento³ uniforme da demanda de cada Ponto de Entrega. Importante relembrar que, em consequência do aumento na demanda, o custo de alocação é impactado na mesma proporção.

³ O incremento na demanda de cada Ponto de Entrega foi arredondado para o número inteiro de pacotes mais próximo

Para que a comparação de custos possibilite uma visão mais clara do resultado sendo apresentado, é necessário que a comparação entre cenários seja simples e direta. Sendo assim, foi feita uma normalização dos custos logísticos por pacote. O cálculo do indicador foi feito com base na fórmula

$$\text{Custo por pacote} = \frac{\text{Custo Total do cenário}}{\text{Demanda do cenário}}$$

Os impactos da análise de sensibilidade podem ser visualizados na Tabela 25.

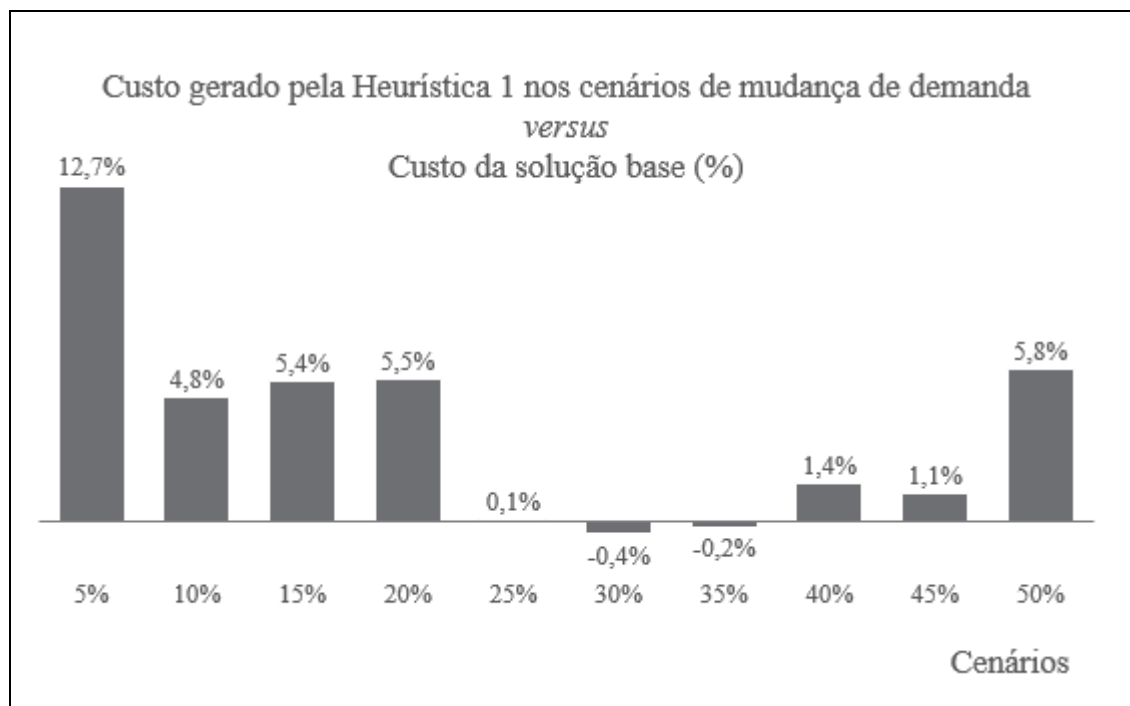
Tabela 25 - Resultados da análise de sensibilidade

Cenário aumento demanda	Demanda (pacotes)	Frete Variável (R\$)	Custo Fixo Veículos (R\$)	Custo Utilização (R\$)	Custo Alocação (R\$)	Custo total (R\$)	Custo/ pacote (R\$)	Varição custo/ pacote (%)	No. CO Abertos
-	15.112	16.055	2.469	14.273	42.131	74.928	4,96	-	7
5%	15.867	26.148	2.473	19.441	40.601	88.703	5,59	13%	11
10%	16.623	22.261	2.473	16.144	45.471	86.350	5,19	5%	7
15%	17.378	24.117	2.473	16.976	47.228	90.793	5,22	5%	7
20%	18.134	27.076	2.473	16.414	48.993	94.826	5,23	5%	7
25%	18.890	22.342	3.293	15.900	52.231	93.766	4,96	0%	6
30%	19.645	24.042	2.473	19.117	51.340	96.971	4,94	0%	9
35%	20.401	23.320	3.293	18.068	56.274	100.955	4,95	0%	8
40%	21.156	28.257	3.293	19.308	55.184	106.403	5,03	1%	9
45%	21.912	28.137	3.293	20.453	57.935	109.818	5,01	1%	9
50%	22.667	33.149	3.293	20.363	62.129	118.935	5,25	6%	11

Fonte: Elaborado pelo autor

Para melhor visualização, os resultados em termos de variação de custos por pacote foram inseridos em um gráfico, disponível na Figura 28.

Figura 28 - Análise de sensibilidade de aumento da demanda com incrementos de 5%



Fonte: Elaborado pelo autor

Em primeiro lugar, na comparação dos resultados para os cenários com a solução recomendada, é possível observar que a Heurística 1 obteve soluções que podem ser agrupadas.

Para 5% de aumento de demanda, houve um grande salto de 12,7% nos custos por pacote atrelados à abertura de 11 COs, contra 7 no cenário base. Este acontecimento ocorre pois o início do algoritmo escolhe especificamente COs com baixa capacidade, o que o força a abrir mais COs do que o comum para encontrar uma primeira solução factível. Isto resulta em maiores custos de utilização e de frete para o abastecimento dos COs, não compensados pela modesta diminuição de custos de alocação.

Entre 10% e 20% de aumento de demanda, o número de COs abertos é o mesmo da solução base. No entanto, os COs abertos são mais custosos e mais distantes entre si, como refletido nos custos de utilização e de frete para abastecimento. O custo resultante é por volta de 5% maior, nestes casos.

Entre 25% e 45% de aumento de demanda, os custos da solução são similares ao cenário base, embora por motivos diferentes. Em 25%, há uma grande diminuição de frete variável e custos de utilização, justificados pelo número de 6 COs ativos. Em 30%, um maior número de COs aumenta os custos de utilização e de frete, mas diminui os demais, devido a uma maior distribuição geográfica dos COs para mais próximos dos clientes. Entre 35% e 45%, há um

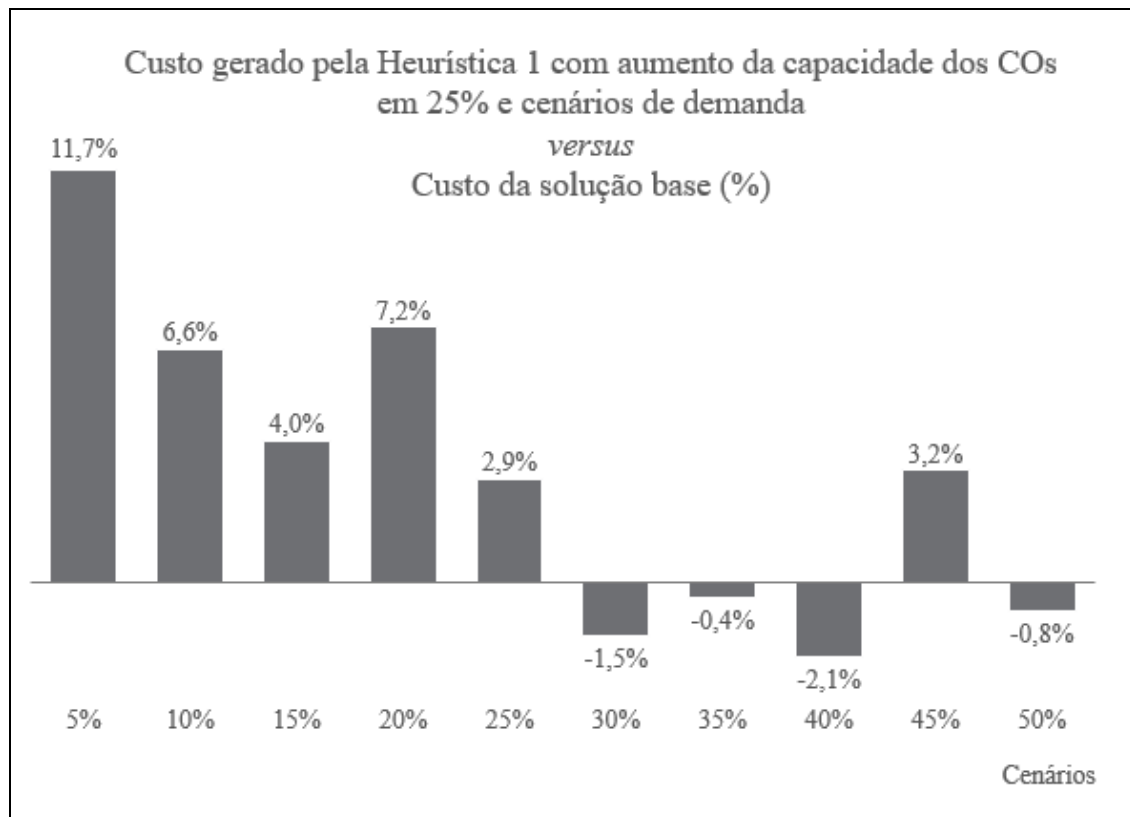
melhor balanceamento de custos, e a maior diferença se dá por um CO adicional, que gera maior frete.

No cenário de 50% de aumento de demanda, ocorre um fato similar ao cenário de 5%, onde de início são abertos mais COs para obter uma primeira solução factível, impactando principalmente o frete variável.

A partir da análise de sensibilidade da demanda, é possível concluir que a configuração logística da B2W não possui expressivos ganhos de escala com relação aos custos fixos com o aumento da demanda. Isto faz sentido pois o custo fixo da estrutura é fragmentado, tanto no caso dos COs, quanto no caso dos veículos; fazendo com que os custos fixos se acomodem conforme a necessidade de maior ou menor capacidade. Isto é positivo por 2 motivos: sugere que a solução encontrada está utilizando os recursos com eficiência, mas também significa a estrutura operada tem certo nível de flexibilidade, podendo se readequar de acordo com mudanças nos parâmetros de demanda.

A não efetivação de ganhos de escala pela fragmentação da estrutura sugere a questão sobre o que ocorreria com o aumento da alavancagem de capacidade dos Centros Operacionais. Na realidade, há a possibilidade de celebração de um novo contrato com os terceiros que operam os COs ou mesmo um aumento da estrutura de estoques no caso das lojas LASA como COs. Sendo assim, desenvolveu-se uma análise de demanda similar à anterior, porém considerando um cenário onde os Centros Operacionais passam por um aumento em sua capacidade de expedição e em custos fixos em 25%. Os resultados são apresentados na Figura 29.

Figura 29 - Análise de sensibilidade de aumento de demanda com incrementos de 5% e cenário de 25% de aumento de capacidade para os COs



Fonte: Elaborado pelo autor

A análise dos resultados do aumento da alavancagem operacional nos Centros Operacionais permitiu observar maiores ganhos de escala em alguns dos cenários de maior aumento de demanda, em relação à estrutura anterior. Isto sugere que, conforme a demanda cresce, torna-se mais vantajoso aumentar a capacidade de operação dos COs. Esta análise é de suma importância ao considerar o dimensionamento de COs para demandas crescentes.

Observa-se, no entanto, que os grupos de soluções encontradas são semelhantes à análise anterior. Isto se deve ao sequenciamento de tomada de decisão da heurística, que favorece este comportamento. É possível, portanto, obter um aprendizado: dada a não otimalidade das heurísticas e a imprevisibilidade, é prudente analisar mais de um cenário para os parâmetros, buscando observar se a configuração encontrada para o cenário base poderia ser melhorada.

Além disso, recordando-se que foi utilizada uma demanda média, é possível considerar a solução de configuração para um cenário de maior demanda. Para tal, é necessário que a empresa avalie se a falta de capacidade pode estar acarretando em atrasos na entrega, uma vez que as demandas no varejo são altamente variáveis.

10. CONCLUSÃO

O trabalho desenvolvido teve como escopo a análise de um problema de otimização na cadeia logística da B2W, uma empresa de *e-commerce* brasileira. O problema é um misto de localização de depósitos, alocação de clientes e roteirização dos depósitos.

A abordagem inicial foi a modelagem do problema em uma formulação de programação linear mista, buscando representar o problema real da melhor forma possível. O modelo foi então implementado através de um *software* utilizado largamente para a resolução de modelos PLIM. No entanto, dado a caracterização do problema como NP-*hard*, por sua complexidade e imprevisibilidade de tempo de resolução, na prática não foi possível encontrar a solução ótima pela resolução exata.

Desta forma, partiu-se para a utilização de metodologias heurísticas, com o objetivo de encontrar soluções de boa qualidade em tempo hábil e prático. Foram então desenvolvidas e implementadas duas opções de heurísticas construtivas, com base na adaptação de métodos propostos já existentes na literatura.

Os resultados das heurísticas foram então comparados com a solução ótima obtida para recortes do problema real, obtendo melhores resultados com a Heurística 1, com uma diferença média de 18% em relação à solução ótima.

As heurísticas foram construídas com base em adaptações e modificações de heurísticas existentes. No caso da Heurística 1, para a decisão de localização, foi utilizada como base o coeficiente de centralidade apresentado por Moshref-Javadi e Lee (2016); para a decisão de alocação, utiliza-se o método das penalidades de Vogel; para a roteirização, utiliza-se a heurística de inserção de Solomon (1987).

Fazendo uso do algoritmo para resolver o problema real, recomenda-se a implementação de uma nova configuração logística, obtendo-se uma melhoria de 4,4% nos custos em relação ao atual da empresa. Além disso, foi possível concluir que é vantajosa a adaptação de um total de 5 lojas físicas da LASA como Centros Operacionais, mantendo 2 Centros Operacionais dos 6 existentes atualmente.

Em seguida, foram realizadas análises de sensibilidade, com o objetivo de testar o comportamento do modelo em face a construção de diferentes cenários incluindo realísticas

variações nos parâmetros, permitindo a validação da estabilidade da metodologia e permitindo soluções alternativas para cenários flutuantes.

Por fim, é possível concluir que o método proposto por este estudo pode também ser replicado para outras localidades com ordens de grandeza similares aos parâmetros utilizados por este estudo. No entanto, deve-se atentar para sua utilização sem cuidados, uma vez que diferentes localidades e problemas podem conter diferentes restrições, parâmetros e objetivos, que devem ser incluídos e ajustados de acordo com necessidades específicas.

Tendo sido feita a recomendação de solução, pode-se partir para a sugestão dos próximos passos a serem tomados em diante.

Em primeiro lugar, sugere-se o alinhamento com os responsáveis pela operação das docas das lojas físicas da LASA a serem ativadas como CO, a fim de estudar a aplicabilidade do dia-a-dia da nova operação. Além disso, é importante a coleta de opiniões sobre a proposição de novas rotas juntamente aos operadores, buscando validar a aplicabilidade e levantar possíveis preocupações ou contraindicações.

Em seguida, é imprescindível orçar custos e auditar dados, com o objetivo de garantir que a solução, na prática, produzirá o custo econômico real quando executada.

Por fim, deve-se traçar um plano de implementação, contendo prazos, responsáveis e recursos necessários para a operacionalização da solução.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARENALES, M. *et al.* **Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia**. 1^a. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 542 p.

B2W. **Comércio Eletrônico no Brasil**. 2019. Disponível em: <<https://ri.b2w.digital/institucional/comercio-eletronico-no-brasil>>. Acesso em: 2 nov. 2019.

B2W. **Relatório Anual e de Sustentabilidade 2015**. 2016. Disponível em: <<https://hotsites.b2wdigital.com/relatorioanual2015/?capitulo=estrategia-e-investimento>>. Acesso em: 26 set. 2019.

B2W. **Release de Resultados de Agosto de 2019**. 2019. Disponível em: <<https://static.b2wdigital.com/upload/releasesderesultados/00003213.pdf>>. Acesso em: 7 out. 2019.

B2W. **Relações com Investidores**. 2019. Disponível em: <<https://ri.b2w.digital/#brands-n-numbers>>. Acesso em: 17 out. 2019.

B2W. **Relatório Anual e de Sustentabilidade 2018**. 2019. Disponível em: <<https://hotsites.b2wdigital.com/relatorioanual2018.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2019.

BALL, Michael O. *et al.* Planning for truck fleet size in the presence of a common-carrier option. **Decision Sciences**, v. 14, n. 1, p. 103-120, 1983.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos/ Logística empresarial**. 5^a. ed. São Paulo: Artmed S.A, 2006.

BELFIORE, P. P. **Scatter Search para problemas de roteirização de veículos com frota heterogênea, janela de tempo e entregas fracionadas**. 2006. 203 p. Dissertação (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

BRÄYSSY, Olli; HASLE, Geir; DULLAERT, Wout. A multi-start local search algorithm for the vehicle routing problem with time windows. **European Journal of Operational Research**, v. 159, n. 3, p. 586-605, 2004.

DA CUNHA, Claudio Barbieri. **Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais**. Transportes, v. 8, n. 2, 2000.

DANTZIG, George B.; RAMSER, John H. The truck dispatching problem. **Management science**, v. 6, n. 1, p. 80-91, 1959.

DASKIN, M. S. **Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications**. 1^a. ed. [S.l.]: Wiley, 1995.

DESROCHERS, Martin; DESROSIERS, Jacques; SOLOMON, Marius. A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows. **Operations research**, v. 40, n. 2, p. 342-354, 1992.

DZATOR, Michael; DZATOR, Janet. **Effective method for locating facilities**. 2015.

E-BIT. **WEBSHOPPERS**. E-BIT, Edição 40, 2019. Disponível em <<https://www.ebit.com.br/webshoppers>>. Acesso em: 4 nov. 2019.

FISHER, Marshall L.; JAIKUMAR, Ramchandran. **A generalized assignment heuristic for vehicle routing**. *Networks*, v. 11, n. 2, p. 109-124, 1981.

GIORDANO, C. M. **Resolução de um problema de localização e roteirização de veículos na indústria de transformação de vidro**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 69-79. 2016.

GLOVER, Fred *et al.* **A computation study on start procedures, basis change criteria, and solution algorithms for transportation problems**. *Management Science*, v. 20, n. 5, p. 793-813, 1974.

GOLDEN, Bruce L.; MAGNANTI, Thomas L.; NGUYEN, Hien Q. **Implementing vehicle routing algorithms**. *Networks*, v. 7, n. 2, p. 113-148, 1977.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e Programação linear**. 2. ed. [S.l.]: Elsevier, 2005.

KESTENBAUM, Richard. What Are Online Marketplaces And What Is Their Future? 2017. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/richardkestenbaum/2017/04/26/what-are-online-marketplaces-and-what-is-their-future/#65d887063284>>. Acesso em: 26 ago. 2019.

INVESTOPEDIA. **Electronic Commerce (e-commerce)**. 2019. Disponível em: <<https://www.investopedia.com/terms/e/ecommerce.asp>>. Acesso em: 28 out. 2019.

LAPORTE, Gilbert. Fifty years of vehicle routing. **Transportation Science**, v. 43, n. 4, p. 408-416, 2009.

MIN, Hokey; JAYARAMAN, Vaidyanathan; SRIVASTAVA, Rajesh. Combined location-routing problems: **A synthesis and future research directions**. *European Journal of Operational Research*, v. 108, n. 1, p. 1-15, 1998.

MOSHREF-JAVADI, M.; LEE, S. The Latency Location-Routing Problem. **European Journal of Operational Research**, v. 255, n. 2, p. 604-619, 2016.

OR, Ilhan; PIERSKALLA, William P. A transportation location-allocation model for regional blood banking. **AIIE transactions**, v. 11, n. 2, p. 86-95, 1979.

PAPADIMITRIOU, Christos H.; STEIGLITZ, Kenneth. 6.1 The Max-Flow, Min-Cut Theorem. **Combinatorial optimization: Algorithms and complexity**, Dover, p. 120-128, 1998.

PERL, Jossef. **A unified warehouse location-routing analysis**. 1983.

PERL, Jossef; DASKIN, Mark S. A warehouse location-routing problem. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 19, n. 5, p. 381-396, 1985.

RODRIGUES *et al.* - "Necessidade da participação da logística para a evolução do varejo", in *Mundo Logística*, Edição 48, setembro/outubro de 2015, pp. 32-50.

RONCONI, Débora P.; MANGUINO, João LV. **HEURÍSTICAS CONSTRUTIVAS PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS COM CUSTOS ESCALONADOS.**

SILVER, E. A. An Overview of Heuristic Solution Methods. **The Journal of the Operational Research Society**, v. 55, n. 9, p. 936-956, 2004.

SOLOMON, Marius M.; DESROSIERS, Jacques. Survey paper—time window constrained routing and scheduling problems. **Transportation science**, v. 22, n. 1, p. 1-13, 1988.

SOLOMON, M. M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. **Operations Research**, Mar - Apr 1987. 254-265.

SPYDER. **The Scientific Python Development Environment**. Disponível em: <<https://www.spyder-ide.org/>>. Acesso em: 30 set. 2019.

SRIKAR, B.; SRIVASTAVA, R. **Solution methodology for the location-routing problem**. In: The ORSA/TIMS conference. 1983.

SRIVASTAVA, Rajesh; BENTON, W. C. The location-routing problem: considerations in physical distribution system design. **Computers & operations research**, v. 17, n. 5, p. 427-435, 1990.

STATISTA. **Percentage of paid units sold by third-party sellers on Amazon platform as of 2nd quarter 2019**. 2019. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/259782/third-party-seller-share-of-amazon-platform/>>. Acesso em: 10 out. 2019.

VAREJO, O Negócio do. **Brasil, Comércio Eletrônico e Transformação Digital**. 2019. Disponível em: <<http://onegociodovarejo.com.br/brasil-comercio-eletronico-e-transformacao-digital/>>. Acesso em: 2 out. 2019.

WINSTON, Wayne L.; GOLDBERG, Jeffrey B. **Operations research: applications and algorithms**. Belmont e Calif Calif: Thomson/Brooks/Cole, 2004.

WU, Tai-Hsi; LOW, Chinyao; BAI, Jiunn-Wei. **Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems**. **Computers & Operations Research**, v. 29, n. 10, p. 1393-1415, 2002.

APÊNDICE A - RESULTADOS DAS VARIÁVEIS DE DECISÃO NO TESTE COM PROBLEMA FICTÍCIO

Valores resultantes na variável y

CO	$y(i)$
1	1
2	1
3	0
4	1
5	0

Valores resultantes na variável o

CO	$O(i)$
0	1
1	2
2	2
3	0
4	3
5	0

Valores resultantes na variável k

Rotas	$k(r)$
1	0
2	0
3	1
4	0
5	1

Valores resultantes na variável t

		Veículos	
		1	2
Rotas	$t(v,r)$	1	2
	1	0	0
	2	0	0
	3	1	0
	4	0	0
	5	0	1

APÊNDICE B - CÓDIGO DA MODELAGEM EM CPLEX OPL

```

/*****
 * OPL 12.9.0.0 Data
 * Author: Rodegher Marcelo
 * Creation Date: 9 de ago de 2019 at 21:05:49
 *****/

a=30;// numero de COs
c=4;// tipo de veiculo
d=398; // numero de pontos de entrega

SheetConnection sheet("Dados_sensib_1.xlsx");

distancia from SheetRead(sheet,"Distancias");
frete from SheetRead(sheet,"Frete");
custo_alocacao from SheetRead(sheet,"CA");
custo_utilizacao from SheetRead(sheet,"CU");
capacidade_veiculos from SheetRead(sheet,"CV");
demandas from SheetRead(sheet,"D");
custo_veiculo from SheetRead(sheet,"CF");
capacidade_expedicao from SheetRead(sheet,"Cap_Op");

/*****
 * OPL 12.9.0.0 Model
 * Author: Rodegher Marcelo
 * Creation Date: 9 de ago de 2019 at 21:05:49
 *****/

// parametros
int a=...;// numero de COs
int c=...; // tipo de veiculo
int d=...;// numero de pontos de entrega
int nhub=0;// nó referente ao HUB (0)

range centros_operacionais=0..a;
range centros_operacionais_cos=1..a;
range rotas=1..a;
range veiculos=1..c;
range pontos_entrega=1..d;

float distancia[centros_operacionais][centros_operacionais]=...;
float custo_utilizacao[centros_operacionais_cos]=...;
float capacidade_veiculos[veiculos]=...;
float capacidade_expedicao[centros_operacionais_cos]=...;
float custo_veiculo[veiculos]=...;
float frete[veiculos]=...;
float custo_alocacao[pontos_entrega][centros_operacionais_cos]=...;
float demandas[pontos_entrega]=...;

//variaveis de decisao

dvar int x[rotas][veiculos][centros_operacionais][centros_operacionais] in 0..1;
dvar int y[centros_operacionais_cos] in 0..1;

```

```

dvar int z[pontos_entrega][centros_operacionais_cos] in 0..1;
dvar int t[rotas][veiculos] in 0..1;
dvar int k[rotas] in 0..1;
dvar int+ o[centros_operacionais];
dvar int+ e[centros_operacionais_cos][rotas];

//funcao objetivo
minimize sum(r in rotas, v in veiculos, i in centros_operacionais, j in
centros_operacionais)x[r][v][i][j]*distancia[i][j]*frete[v]
+sum(i in centros_operacionais_cos, p in
pontos_entrega)z[p][i]*custo_alocacao[p][i]
+sum(i in centros_operacionais_cos)y[i]*custo_utilizacao[i]
+sum(r in rotas, v in veiculos)t[r][v]*custo_veiculo[v];

subject to{

cons1: //conservacao de fluxos
forall(r in rotas, v in veiculos)
forall(f in centros_operacionais)
    sum(i in centros_operacionais)x[r][v][i][f]-sum(j in
centros_operacionais)x[r][v][f][j]==0;

cons2: //ordena e evita subtours
forall(i in centros_operacionais, j in centros_operacionais_cos)
    o[i]+1-10*(1-sum(r in rotas, v in veiculos)x[r][v][i][j])<=o[j];

cons3: //seta variavel k para cada rota ativa
forall(r in rotas)
    1000*k[r]>=sum(i in centros_operacionais, j in centros_operacionais_cos, v
in veiculos)x[r][v][i][j];

cons4: //define que rota deve sair de HUB
forall(r in rotas)
    sum(j in centros_operacionais_cos, v in veiculos)x[r][v][nhub][j]-k[r]==0;

cons5: //seta variavel y que relaciona COs a rotas
forall(j in centros_operacionais_cos)
    sum(r in rotas, v in veiculos, i in
centros_operacionais)x[r][v][i][j]==y[j];

cons6: //variavel z - pontos de entrega devem ser atendidos
forall(p in pontos_entrega)
    sum(i in centros_operacionais_cos)z[p][i]==1;

cons7://se ha um cliente alocado a CO i, entao ele é ativado
forall(i in centros_operacionais_cos)
    sum(p in pontos_entrega)z[p][i]<=100000*y[i];

cons8://associa cada rota ao seu respectivo veiculo t(rv)
forall(r in rotas, v in veiculos)
    t[r][v]==sum(j in centros_operacionais_cos)x[r][v][nhub][j];

cons9://define a entrega encomendada por cada centro operacional
forall(i in centros_operacionais_cos)
    sum(r in rotas)e[i][r]==sum(p in pontos_entrega)z[p][i]*demandas[p];

```

```

cons10://garante que a capacidade do tipo de veículo escolhido não seja excedida
pelas encomendas de cada CO em uma rota
forall(r in rotas)
    sum(j in centros_operacionais_cos)e[j][r]<=sum(v in
veiculos)t[r][v]*capacidade_veiculos[v];

cons11://limita uma única rota atendendo às encomendas de um centro operacional
forall(r in rotas, j in centros_operacionais_cos)
    e[j][r]<=1000*sum(i in centros_operacionais, v in veiculos)x[r][v][i][j];

cons12://define a entrega encomendada por cada centro operacional
forall(i in centros_operacionais_cos)
    sum(p in pontos_entrega)z[p][i]*demandas[p]<=capacidade_expedicao[i];
}

```

APÊNDICE C - CÓDIGO DAS HEURÍSTICAS EM PYTHON

Dada a extensão dos códigos e a repetição de uma boa parte das funções e estrutura principal entre ambos, será apresentado o código da Heurística 1 por completo e a diferente função auxiliar utilizada pela Heurística 2.

Heurística 1

```
"""
```

```
Created on Sat Sep 28 22:52:46 2019
```

```
@author: Rodegher Marcelo
```

```
"""
```

```
import numpy as np
import pandas as pd
import time
start_time = time.time()
```

```
' _____FUNÇÕES AUXILIARES_____'
```

```
def abre_co(co_disponiveis, co_abertos, pe_disponiveis, dados_co, custo_alocacao):
```

```
    centralidade=pd.DataFrame(index=co_disponiveis,columns=['Abertura','Centralidade','Utiliza
cao'])
```

```
    centralidade=centralidade.fillna(0)
```

```
    for i in co_disponiveis:
```

```
        for p in pe_disponiveis:
```

```
            centralidade.loc[i,['Centralidade']] = centralidade.loc[i,['Centralidade']] + 1/(1 +
```

```
custo_alocacao.loc[p, i])
```

```
            centralidade.loc[i,['Utilizacao']] = dados_co.loc['CU',i]/dados_co.sum(axis=1).loc["CU"]
```

```
    centralidade=centralidade.sort_values('Centralidade',ascending=False)
```

```
    centralidade['Abertura'] = centralidade['Centralidade']*(1-centralidade['Utilizacao'])
```

```
    novo_co = centralidade.iloc[[0],[0]].index.values[0]
```

```
    co_disponiveis.remove(novo_co)
```

```
    co_abertos.append(novo_co)
```

```
    return (co_disponiveis,co_abertos)
```

```
def coef_penalidade(lista_cos, pe, custo_alocacao):
```

```
    penalidade=pd.DataFrame(index=pe,columns=['Penalidade','custo_1','custo_2'])
```

```
    for p in pe:
```

```
        custo = custo_alocacao.loc[:,lista_cos].sort_values(p, axis=1,ascending=True)
```

```
        penalidade.loc[p, 'custo_1'] = custo.iloc[custo.index.get_loc(p),0]
```

```
        penalidade.loc[p, 'custo_2'] = custo.iloc[custo.index.get_loc(p),1]
```

```
    penalidade['Penalidade'] = penalidade['custo_2'] - penalidade['custo_1']
```

```
    penalidade=penalidade.sort_values('Penalidade',ascending=False)
```

```
    return(penalidade)
```

```

def alocao_factivel(novo_co, pe_disponiveis, alocao, capacidade, remessas,
custo_alocacao, veiculos):
    pe_aloca=pd.DataFrame(columns=[novo_co],dtype=object)
    capacidade_livre=capacidade.loc['Cap', [novo_co]].values[0]
    capacidade_ocupada=0
    pe_ordenados=custo_alocacao.loc[pe_disponiveis,[novo_co]].sort_values(novo_co)
    cap_maior_veic=veiculos.sort_values('Capacidade',
ascending=False).iloc[0,veiculos.columns.get_loc('Capacidade')]
    for p in pe_ordenados.loc[:,[novo_co]].index.values:
        if (remessas.loc[p,'Demanda'] <= capacidade_livre) and (capacidade_ocupada +
remessas.loc[p,'Demanda'] < cap_maior_veic):
            capacidade_livre = capacidade_livre - remessas.loc[p,'Demanda']
            capacidade_ocupada = capacidade_ocupada + remessas.loc[p,'Demanda']
            p_app=pd.DataFrame([p], columns=[novo_co])
            pe_aloca=pe_aloca.append(p_app, ignore_index=True)
            pe_disponiveis.remove(p)
    alocao=pd.concat([alocacao,pe_aloca], axis=1)
    alocao=alocacao.fillna("")
    return (alocacao, pe_disponiveis)

```

```

def alocao_pe_penalidade(lista_cos, lista_penal, capacidade, remessas, custo_alocacao,
veiculos):
    alocao=pd.DataFrame(columns=lista_cos, dtype=object)
    capacidade_livre=capacidade.loc['Cap', lista_cos]
    capacidade_ocupada=pd.DataFrame(0,index=lista_cos, columns=['ocup'])
    cap_maior_veic=veiculos.sort_values('Capacidade',
ascending=False).iloc[0,veiculos.columns.get_loc('Capacidade')]
    for p in lista_penal.loc[:, 'Penalidade'].index.values:
        aloc=False
        i=0
        while aloc==False:
            co_proximo=custo_alocacao.loc[:,lista_cos].sort_values(p,
axis=1,ascending=True).iloc[0].index.values[i]
            if capacidade_livre.loc[co_proximo]>=remessas.loc[p,'Demanda'] and
(capacidade_ocupada.loc[co_proximo].values[0] + remessas.loc[p,'Demanda'] <=
cap_maior_veic):
                pe_aloca=pd.DataFrame(columns=[co_proximo],dtype=object)
                p_app=pd.DataFrame([p], columns=[co_proximo])
                pe_aloca=pe_aloca.append(p_app, ignore_index=True)
                capacidade_livre[co_proximo]=capacidade_livre[co_proximo] -
remessas.loc[p,'Demanda']

```

```

                capacidade_ocupada.loc[co_proximo].values[0]=capacidade_ocupada.loc[co_proximo].value
s[0] + remessas.loc[p,'Demanda']
                aloc=True
            else:
                i += 1
        alocao=pd.concat([alocacao,pe_aloca], keys=lista_cos, ignore_index=True,
sort=False)
        shifted_alocacao = alocao.apply(lambda x: pd.Series(x.dropna().values), axis=0).fillna("")

```

```

return (shifted_alocacao)

def primeira_rota(distancia, co_abertos, veiculos, demanda_cos):
    flag=0
    flag2=0
    i=0
    while flag == 0:
        primeiro_co=distancia.sort_values('HUB1',ascending=False).iloc[[i],[0]]
        if primeiro_co.index.values in co_abertos:
            flag=1
            i += 1
    co = primeiro_co.index[0]
    cap_veic=veiculos['Capacidade'].sort_values(ascending=True)
    i=0
    while flag2 == 0:
        if demanda_cos[co].values[0] < cap_veic[i]:
            flag2=1
            i+=1
    i-=1
    veiculo=veiculos.index[i]
    rota0=[veiculo,'HUB1', co , 'HUB1']
    primeira_rota=pd.DataFrame(rota0, columns=['Rota1'])
    demanda_rotas=pd.DataFrame([demanda_cos[co].values[0]],columns=['Rota1'])
    return(primeira_rota, co, demanda_rotas)

def coef1(rotas_existentes, distancia, veiculos,co_rodada,demanda_cos, demanda_rotas):
    Coef_1=1000000
    flag2=1
    custo_atualizacao=0

    rotas_existent=rotas_existentes.copy(deep=True)
    lista_rotas=rotas_existent.columns.values
    co=co_rodada
    nome_rota='Rota1'

    for rota in lista_rotas:
        i=2
        while i<len(rotas_existentes[rota]):
            rotas_existent=rotas_existent.fillna("")
            check_value = rotas_existent.iloc[[i],rotas_existent.columns.get_loc(rota)].values[0]
            print(check_value)
            if not check_value:
                print("BREEEEEEAK")
                break
            Coef_teste=1000000000
            veic_atual=rotas_existent.iloc[[0],rotas_existent.columns.get_loc(rota)][0]
            cap_veic_all=(veiculos['Capacidade'].sort_values(ascending=True))#teste
            cap_veic=veiculos['Capacidade'][veic_atual]
            if demanda_cos[co][0]+demanda_rotas[rota].values[0] > cap_veic:
                flag2=0

```

```

cap_veic_all=veiculos['Capacidade'].sort_values(ascending=True)
j=0
while j<(len(cap_veic_all)) and flag2!=1:
    if demanda_cos[co][0]+demanda_rotas[rota].values[0] < cap_veic_all[j]:
        flag2=1
        j+=1
    j-=1
    if flag2==0:
        print('Nenhum veiculo atende a insercao, nao factivel')
    elif flag2==1:
        custo_atualizacao=veiculos['Custo_Fixo'][j]-veiculos['Custo_Fixo'][veic_atual]
        print('Custo Atualizacao:', custo_atualizacao)
        veic_atual=cap_veic_all.index[j]
        print('Veiculo atualizado')
frete=veiculos.loc[veic_atual,'Custo_por_km']
Ni=rotas_existentes.iloc[[i-1],rotas_existentes.columns.get_loc(rota)]
Nj=rotas_existentes.iloc[[i],rotas_existentes.columns.get_loc(rota)]
Dij=distancia.loc[Ni,Nj].values[0][0]
Dix=distancia.loc[Ni,co].values[0]
Dxj=distancia.loc[co,Nj].values[0]
if flag2 == 1:
    Coef_teste=(Dix+Dxj-Dij)*frete+custo_atualizacao
if Coef_teste < Coef_1 and flag2 == 1:
    Coef_1=Coef_teste
    ponto_insercao=i
    co_escolhido=co
    nome_rota=rota
    i+=1
rotas_alternativa=rotas_existent.append({nome_rota :0}, ignore_index=True)
if flag2==1:
    rotas_alternativa[rota]=np.insert(rotas_existent[nome_rota].values, ponto_insercao,
co_escolhido)
    rotas_alternativa.fillna("")
    rotas_alternativa[nome_rota][0]=veic_atual
    return(Coef_1, rotas_alternativa, nome_rota)

def coef2(rotas_existentes, co, distancia, veiculos, Coef_1, rota_alternativa_c1, demanda_co,
demanda_rotas, nome_rota):
    cap_veic=veiculos['Capacidade'].sort_values(ascending=True)
    i=0
    flag2=0
    while flag2 == 0:
        if demanda_co[co].values[0] <= cap_veic[i]:
            flag2=1
            i+=1
        i-=1
    veiculo=veiculos.index[i]
    frete=veiculos.loc[veiculo,'Custo_por_km']
    veic_fixo=veiculos.loc[veiculo,'Custo_Fixo']
    Dhi=distancia.loc['HUB1',co]

```

```

Dih=distancia.loc[co, 'HUB1']
custo_direta=veic_fixo+frete*(Dhi+Dih)
Coef2=custo_direta-Coef_1

```

```

return(Coef2)

```

```

def abre_nova_rota(rotas_existentes, co_rotear, distancia, co_abertos, veiculos, demanda_cos,
demanda_rotas):

```

```

    flag=0

```

```

    flag2=0

```

```

    i=0

```

```

    while flag == 0:

```

```

        novo_co=distancia.sort_values('HUB1',ascending=False).iloc[[i],[0]]

```

```

        if novo_co.index.values in co_rotear:

```

```

            flag=1

```

```

        i += 1

```

```

    co = novo_co.index[0]

```

```

    cap_veic=veiculos['Capacidade'].sort_values(ascending=True)

```

```

    i=0

```

```

    while flag2 == 0:

```

```

        if demanda_cos[co].values[0] <= cap_veic[i]:

```

```

            flag2=1

```

```

        i+=1

```

```

    i-=1

```

```

    veiculo=veiculos.index[i]

```

```

    indexador=(len(rotas_existentes.columns.values)+1)

```

```

    indexador='Rota'+str(indexador)

```

```

    rotas_existentes[indexador]=pd.DataFrame([veiculo,'HUB1', co , 'HUB1'],

```

```

columns=[indexador])

```

```

demanda_rotas[indexador]=pd.DataFrame([demanda_cos[co].values[0]],columns=[indexador
])

```

```

    rotas_existentes=rotas_existentes.fillna("")

```

```

    return(rotas_existentes, demanda_rotas, novo_co.index.values[0])

```

```

def demanda_cos(alocacao, remessas):

```

```

    lista_cos=alocacao.columns

```

```

    demanda_vol=pd.DataFrame(columns=lista_cos)

```

```

    demanda_vol.loc[0]=[0]*len(demanda_vol.columns.values)

```

```

    for i in lista_cos:

```

```

        lista_pe=alocacao[i].values

```

```

        for p in lista_pe:

```

```

            if str(p) != "":

```

```

                vol=remessas.loc[p,'Demanda']

```

```

                demanda_vol[i]=demanda_vol[i]+vol

```

```

    return(demanda_vol)

```

```

def custo_cenario(alocacao, rotas_existentes, custo_alocacao, distancia, veiculos, dados_co):

```

```

    Frete_var=0

```

```

    Custo_veic=0

```

```

Custo_Ut=0
Custo_aloc=0
Custo_cenario=0
for i in alocação.columns:
    for j in alocação[i].values:
        try:
            Custo_aloc= Custo_aloc + custo_alocação.loc[j,i]
        except:
            pass
for rota in rotas_existentes.columns:
    veic_atual=rotas_existentes.iloc[[0],rotas_existentes.columns.get_loc(rota)][0]
    Custo_veic=Custo_veic+veiculos.loc[veic_atual,'Custo_Fixo']
    for j in range(len(rotas_existentes[rota].index)-2):
        Ni=rotas_existentes.iloc[[j+1],rotas_existentes.columns.get_loc(rota)].values[0]
        Nj=rotas_existentes.iloc[[j+2],rotas_existentes.columns.get_loc(rota)].values[0]
        try:
            Dij=distancia.loc[Ni,Nj]
            veic_atual=rotas_existentes.iloc[[0],rotas_existentes.columns.get_loc(rota)][0]
            frete=veiculos.loc[veic_atual,'Custo_por_km']
            Frete_var=Frete_var+frete*Dij
        except:
            pass
for rota in rotas_existentes.columns:
    for j in range(len((rotas_existentes[rota].index))-3):
        try:
            co_ab=rotas_existentes.iloc[[j+2],rotas_existentes.columns.get_loc(rota)].values[0]
            Custo_Ut=Custo_Ut+ dados_co.loc['CU', co_ab]
        except:
            pass
print("Frete variavel: ", Frete_var)
print("Custo veic: ", Custo_veic)
print("Custo Utilização: ", Custo_Ut)
print("Custo alocação: ", Custo_aloc)
Custo_cenario=Frete_var+Custo_veic+Custo_Ut+Custo_aloc
return(Custo_cenario)

```

' _____ CÓDIGO PRINCIPAL _____

def main():

```

    distancia=pd.read_excel('Dados_oficiais_v5.xlsx', 'Distancias', index_col=0, header=0)
    dados_co=pd.read_excel('Dados_oficiais_v5.xlsx', 'Cidades', index_col=0, header=0)
    custo_alocação=pd.read_excel('Dados_oficiais_v5.xlsx', 'Alocação', index_col=0,
header=0)
    remessas=pd.read_excel('Dados_oficiais_v5.xlsx', 'Demandas', index_col=0, header=0)
    veiculos=pd.read_excel('Dados_oficiais_v5.xlsx', 'Info_Veiculos', index_col=0, header=0)

    nro_cos=30
    nro_pe=398
    nro_veic=4

```

```

distancia=distancia.iloc[:(nro_cos+1), :(nro_cos+1)]
dados_co=dados_co.iloc[:,nro_cos]
custo_alocacao=custo_alocacao.iloc[:nro_pe,:(nro_cos)]
remessas=remessas.iloc[:nro_pe]
veiculos=veiculos.iloc[(4-nro_veic):4]

best_custo=1000000000000
best_alocacao=pd.DataFrame(dtype=object)
best_demanda=pd.DataFrame(dtype=object)
best_rotas=pd.DataFrame(dtype=object)

co_disponiveis=list(custo_alocacao.columns)
co_abertos=[]
co_abertos_real=[]
pe_disponiveis=list(custo_alocacao.index)
lista_pe=list(custo_alocacao.index)

alocacao=pd.DataFrame(dtype=object)
Factive1 = False

#FASE 1: ENCONTRA SOLUÇÃO FACTÍVEL

while not Factive1:
    #Calcula coeficientes de abertura
    co_disponiveis, co_abertos =
abre_co(co_disponiveis,co_abertos,pe_disponiveis,dados_co, custo_alocacao)
    print("Abri um CO:",co_abertos)
    #Aloca PEs mais próximos
    alocacao, pe_disponiveis = alocacao_factive1(co_abertos[-1], pe_disponiveis, alocacao,
dados_co, remessas, custo_alocacao, veiculos)
    if not pe_disponiveis:
        Factive1=True

primeira_vez=True

co_disponiveis_copia=co_disponiveis[:]

for count in range(len(co_disponiveis_copia)):
    if not primeira_vez:
        co_abertos=co_abertos_real[:]
        print(co_abertos_real)
        co_disponiveis, co_abertos =
abre_co(co_disponiveis,co_abertos,pe_disponiveis,dados_co, custo_alocacao)

# FASE 2: REALOCA PONTOS DE ENTREGA

if len(co_abertos)>1:
    matriz_penalidades=coef_penalidade(co_abertos, lista_pe, custo_alocacao)

```

```

    alocao=alocacao_pe_penalidade(co_abertos,matriz_penalidades,dados_co,remessas,
custo_alocacao, veiculos)

    elif len(co_abertos)==1:
        alocao=pd.DataFrame(dtype=object)
        listagem_pe=lista_pe[:]
        alocao, pe_disponiveis = alocao_factive(co_abertos[-1], listagem_pe, alocao,
dados_co, remessas, custo_alocacao, veiculos)

    #Mede as entregas designadas a cada CO
    demanda_co=demanda_cos(alocacao, remessas)

    # FASE 3: ATRIBUI ROTAS

    #Abre primeira rota
    rotas_existentes, primeiro_co, demanda_rotas=primeira_rota(distancia, co_abertos,
veiculos, demanda_co)
    co_rotear=co_abertos[:]
    co_rotear.remove(primeiro_co)

    #Abre demais rotas
    while co_rotear:
        nome_co=[]
        nome_rotas_c1=[]
        rotas_c1=[]
        valores_c2=[]
        print("co rotear", co_rotear)

        for co in co_rotear:
            Coef_1, rota_alternativa_c1, nome_rota_mod = coef1(rotas_existentes, distancia,
veiculos, co, demanda_co, demanda_rotas)
            rotas_c1.append(rota_alternativa_c1)
            nome_rotas_c1.append(nome_rota_mod)
            nome_co.append(co)

            Coef2=coef2(rotas_existentes,co,distancia, veiculos, Coef_1,rota_alternativa_c1,
demanda_co, demanda_rotas, nome_rota_mod)
            valores_c2.append(Coef2)

        if max(valores_c2)>=0:
            index_c2=valores_c2.index(max(valores_c2))
            while len(rotas_existentes[nome_rotas_c1[index_c2]])<len(rotas_c1[index_c2]):
                rotas_existentes=rotas_existentes.append(pd.Series(), ignore_index=True)

    rotas_existentes[nome_rotas_c1[index_c2]]=rotas_c1[index_c2][nome_rotas_c1[index_c2]]

    demanda_rotas[nome_rotas_c1[index_c2]].values[0]=demanda_rotas[nome_rotas_c1[index_c
2]].values[0]+demanda_co[nome_co[index_c2]]

```

```

co_roteado=nome_co[index_c2]

elif max(valores_c2)<0:
    print('ABRE NOVA ROTA')
    rotas_existentes, demanda_rotas, co_roteado=abre_nova_rota(rotas_existentes,
co_rotear, distancia, co_abertos, veiculos, demanda_co, demanda_rotas)
    co_rotear.remove(co_roteado)

#Calcula custo do cenário
custo_cen=custo_cenario(alocacao, rotas_existentes, custo_alocacao, distancia, veiculos,
dados_co)
print('Custo cenario', custo_cen)

if custo_cen<best_custo:
    best_custo=custo_cen
    best_alocacao=alocacao.copy(deep=True)
    best_demanda_rotas=demanda_rotas.copy(deep=True)
    best_demanda_cos=demanda_co.copy(deep=True)
    best_rotas=rotas_existentes.copy(deep=True)
    co_abertos_real=co_abertos[:]
    print("Best rotas", best_rotas)
    print("Best Custo",best_custo)
    print("CO ABERTOS REAL", co_abertos_real)
    print("Best Custo Atualizado")

primeira_vez=False

#Fim do loop de refinamento
print("Best demanda rotas: \n", best_demanda_rotas)
print("Best rotas\n", best_rotas)
print("Best alocacao", best_alocacao)
print("Custo cenario:\n", custo_cenario(best_alocacao, best_rotas, custo_alocacao,
distancia, veiculos, dados_co))

best_rotas.to_csv('Rotas_Heu1.csv', sep=';', decimal=',')
best_alocacao.to_csv('Aloc_Heu1.csv', sep=';', decimal=',')

print("The end")
print("--- %s seconds ---" % (time.time() - start_time))

main()

```

Heurística 2

```

def Myopic(co_disponiveis, co_abertos, pe_disponiveis, dados_co, custo_alocacao, n):

```

```

coef_p=3*n
matriz_reduzida=pd.DataFrame(columns=co_disponiveis)
matriz_custo=custo_alocacao.copy()
for co in co_disponiveis:
    lista_dist=custo_alocacao.sort_values(co,ascending=True)
    lista_dist=lista_dist[co].values
    matriz_reduzida[co]=lista_dist[:(len(lista_dist)-coef_p)]
primeiro_co=matriz_reduzida.sum().sort_values(ascending=True).index[0]

co_disponiveis.remove(primeiro_co)
co_abertos.append(primeiro_co)
for co in co_disponiveis:
    for p in pe_disponiveis:
        if co != primeiro_co:
            if matriz_custo.loc[p,co] > matriz_custo.loc[p,primeiro_co]:
                matriz_custo.loc[p,co]=matriz_custo.loc[p,primeiro_co]
custo_alocacao=custo_alocacao
matriz_custo=matriz_custo.drop(primeiro_co, axis=1)
i=1
while i<n:

    melhor_co=matriz_custo.sum().sort_values(ascending=True).index[0]
    for co in co_disponiveis:
        for p in pe_disponiveis:
            if co != primeiro_co:
                if matriz_custo.loc[p][co] > matriz_custo.loc[p][melhor_co]:
                    matriz_custo.loc[p][co] = matriz_custo.loc[p][melhor_co]
    matriz_custo=matriz_custo.drop(melhor_co, axis=1)

    i+=1
    co_disponiveis.remove(melhor_co)
    co_abertos.append(melhor_co)
return(co_disponiveis, co_abertos)

```

APÊNDICE D - ALOCAÇÃO COMPLETA NA SOLUÇÃO RECOMENDADA

C062	C374	C018	C110	C192	C094	C060
PE070	PE374	PE018	PE110	PE192	PE094	PE276
PE120	PE136	PE210	PE295	PE053	PE266	PE060
PE380	PE146	PE019	PE200	PE142	PE004	PE184
PE062	PE302	PE206	PE389	PE397	PE057	PE020
PE388	PE033	PE199	PE248	PE392	PE080	PE170
PE204	PE267	PE171	PE138	PE095	PE041	PE287
PE220	PE107	PE244	PE003	PE367	PE279	PE378
PE077	PE042	PE043	PE254	PE086	PE269	PE349
PE251	PE360	PE054	PE217	PE366	PE029	PE061
PE026	PE039	PE063	PE311	PE140	PE249	PE163
PE123		PE183	PE379	PE177	PE270	PE112
PE099		PE051	PE277	PE025	PE353	PE282
PE022		PE207	PE265	PE391	PE351	PE087
PE126		PE215	PE260	PE381	PE151	
PE261		PE361	PE124	PE030	PE363	
PE049		PE243	PE059	PE268	PE196	
PE354		PE307	PE259	PE113	PE036	
PE129		PE111	PE017	PE334	PE300	
PE375		PE263	PE084	PE289	PE131	
PE324		PE100	PE226	PE052	PE090	
PE387		PE250	PE016	PE069	PE306	
PE299		PE232		PE014	PE079	
PE085		PE186		PE167	PE071	
PE292		PE316		PE179	PE147	
PE055		PE371		PE168	PE023	
PE066		PE078		PE330	PE271	
PE377		PE385		PE173	PE373	
PE319		PE296		PE297	PE345	
PE231		PE288		PE365	PE290	
PE037		PE105		PE318	PE211	
PE333		PE013		PE083	PE154	
PE216		PE258		PE286	PE074	
PE075		PE257		PE035	PE148	
PE197		PE332		PE312	PE068	
PE012		PE212		PE132	PE161	
PE104		PE221		PE278	PE002	
PE067		PE314		PE187	PE310	
PE152		PE143		PE010	PE102	
PE256		PE189		PE117	PE383	
PE239		PE165		PE158	PE137	
PE224		PE328		PE304		
PE157		PE238		PE235		
PE172		PE209		PE358		
PE108		PE122		PE320		
PE178		PE313		PE230		
PE241		PE252		PE001		
PE145		PE262		PE082		
PE091		PE050		PE321		
PE040		PE284		PE335		
PE193		PE045		PE305		

PE031		PE038		PE169		
PE009		PE106		PE032		
PE338		PE398		PE073		
PE135		PE097		PE195		
PE089		PE213		PE240		
PE355		PE205		PE283		
PE393		PE006		PE339		
PE181		PE185		PE337		
PE119		PE174		PE325		
PE364		PE234		PE048		
PE386		PE322		PE223		
PE294		PE155		PE134		
PE046		PE064		PE156		
PE225		PE236		PE228		
PE275		PE394		PE176		
PE008		PE315		PE341		
PE202		PE342		PE255		
PE072		PE109		PE180		
PE190		PE317				
PE141		PE372				
PE384		PE182				
PE382		PE298				
PE327		PE350				
PE098		PE153				
PE246		PE293				
		PE150				
		PE291				
		PE359				
		PE303				
		PE326				
		PE047				
		PE272				
		PE218				
		PE308				
		PE133				
		PE264				
		PE058				
		PE114				
		PE340				
		PE034				
		PE005				
		PE237				
		PE274				
		PE347				
		PE222				
		PE101				
		PE121				
		PE376				
		PE281				
		PE301				
		PE346				
		PE368				
		PE219				

		PE242				
		PE096				
		PE208				
		PE139				
		PE093				
		PE128				
		PE103				
		PE027				
		PE201				
		PE348				
		PE115				
		PE065				
		PE370				
		PE362				
		PE160				
		PE125				
		PE331				
		PE130				
		PE352				
		PE164				
		PE056				
		PE116				
		PE357				
		PE007				
		PE044				
		PE011				
		PE188				
		PE015				
		PE166				
		PE245				
		PE233				
		PE214				
		PE309				
		PE175				
		PE229				
		PE356				
		PE253				
		PE162				
		PE028				
		PE203				
		PE088				
		PE144				
		PE076				
		PE021				
		PE247				
		PE344				
		PE118				
		PE191				
		PE329				
		PE127				
		PE198				
		PE227				
		PE280				

		PE273				
		PE323				
		PE092				
		PE159				
		PE149				
		PE390				
		PE369				
		PE336				
		PE194				
		PE395				
		PE081				
		PE396				
		PE343				

APÊNDICE E - AMOSTRA DOS DADOS REAIS UTILIZADOS PARA A RESOLUÇÃO

Veículo	Capacidade	Custo_Fixo	Custo_por_km
CARRETA	6.000	R\$ 824,23	R\$ 9,98

	C018	C019	C023	C053	C060
CU	3.604	705	2.385	318	514
Cap	4.000	1.000	2.500	200	500

Distância (km)	HUB1	C018	C019	C023	C053
HUB1	-	476	489	17	492
C018	476	-	20	479	41
C019	489	20	-	493	23
C023	17	479	493	-	497
C053	492	41	23	497	-

Alocação (R\$)	C018	C019	C023	C053	C060
PE001	44,488	44,392	60,268	43,6	58,582
PE002	81,558	82,44	52,677	82,26	51,867
PE003	68,212	69,076	39,778	69,358	41,428
PE004	301,016	306,008	110,474	306,944	106,964
PE005	11,903	12,395	20,42	13,094	19,634
PE006	53,968	53,86	80,452	54,676	78,766
PE007	65,114	64,07	122,198	64,97	118,706