

RICARDO BORSARI BRINATI

RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE CENTRO(S) DE
DISTRIBUIÇÃO E ATENDIMENTO À DEMANDA NO SETOR DE COSMÉTICOS

São Paulo

2021

RICARDO BORSARI BRINATI

RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE CENTRO(S) DE
DISTRIBUIÇÃO E ATENDIMENTO À DEMANDA NO SETOR DE COSMÉTICOS

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

São Paulo

2021

RICARDO BORSARI BRINATI

RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE CENTRO(S) DE
DISTRIBUIÇÃO E ATENDIMENTO À DEMANDA NO SETOR DE COSMÉTICOS

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

Orientadora:

Prof^ª. Dra. Débora Pretti Ronconi

São Paulo

2021

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

Brinati, Ricardo

RESOLUÇÃO DE UM PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE CENTRO(S) DE DISTRIBUIÇÃO E ATENDIMENTO À DEMANDA NO SETOR DE COSMÉTICOS / R. Brinati -- São Paulo, 2021.

144 p.

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

1.Pesquisa Operacional 2.Logística 3.Localização 4.Alocação 5.Custos Escalonados I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e à toda a minha família por todo o suporte e amor recebidos ao longo da minha vida, assim como pelos valores que me foram ensinados. Vocês foram essenciais para que eu tenha me tornado a pessoa que eu sou hoje e considero uma sorte muito grande ter vocês como minha família.

Agradeço também a todos os professores e professoras que tive ao longo da minha vida por sua contribuição para minha formação, tanto em termos pessoais quanto profissionais. Agradeço especialmente a professora Débora Pretti Ronconi, por sua dedicação e por todo o apoio oferecido ao longo da realização desse trabalho de formatura.

Registro também meus agradecimentos aos meus amigos da Escola Politécnica, e, em especial, à Artur Gil, João Parizotto, Lucas Vidigal, Pedro Mello e Rodrigo Gasparian que foram tão importantes para minha formação acadêmica e profissional, além de terem feito meus dias na Poli muito mais agradáveis.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o estudo do modelo de distribuição de uma empresa do setor de cosméticos e a proposição, com base em ferramentas de pesquisa operacional, de uma nova configuração que otimize os seus custos logísticos. O problema abordado envolve a definição de quais centros de distribuição (CDs) devem ser abertos, e como a demanda dos clientes deve ser alocada entre esses CDs. Para isso, leva em consideração os custos de operação fixos e variáveis dos centros de distribuição, além do custo de transporte, tanto entre os fornecedores e os CDs, quanto entre CDs e clientes. A movimentação de mercadorias em ambos os trechos, no contexto analisado, é realizada por terceiros, sendo o valor cobrado uma função escalonada da distância percorrida e da quantidade transportada. Tem-se, portanto, um problema misto de localização e alocação, com custos de transportes escalonados. Neste trabalho, é desenvolvida a modelagem matemática para o problema abordado com o uso de programação linear inteira mista (PLIM). Os resultados obtidos com a abordagem proposta indicam que a configuração ótima para a empresa envolveria a abertura de um segundo centro de distribuição, levando a uma economia moderada nos custos logísticos em comparação a situação atual, porém com a tendência de se tornar mais significativa no futuro com o aumento previsto nas vendas da empresa.

Palavras-chave: Pesquisa Operacional. Logística. Localização. Alocação. Custos Escalonados.

ABSTRACT

This report has the goal of studying the distribution model of a cosmetic company and proposing, based on operational research techniques, a new configuration that leads to an optimized logistical cost. The problem addressed involves the definition of which distribution centers (CDs) will be opened and how the clients demand will be allocated between them. For this decision the fixed and variable operation cost of the distribution centers will be taken into consideration, as well as the transportation both between the suppliers and the CDs and between the CDs and the customers. The transportation of goods, in both cases, are outsourced to other companies, and the charged value is a scales function of the travelled distance and the amount moved. Therefore, this is a mixed location and allocation problem, with a scaled transportation cost. In this report, the mathematical modelling of the problem is developed, characterized as a mixed linear integer program. The results obtained show that the optimal configuration for the company is the opening of a second distribution center, leading to a moderate economy in their logistical costs, when compared to the present situation, but with the tendency to become more significant in the future, due to the predicted increase in sales.

Key Words: Operations Research. Logistic. Location. Allocation. Scaled Costs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição da faixa de peso por pedido para cada tipo de cliente.....	20
Figura 2: Distribuição das vendas da Cosméticos S.A. por região.....	20
Figura 3: Relação entre custo por frete, peso transportado e distância percorrida.....	26
Figura 4: Exemplo de função contínua linear por partes.....	34
Figura 5: Mapa ilustrativo do exemplo com dimensões reduzidas.....	49
Figura 6: Análise Histórica da Demanda.....	58
Figura 7: Mapa ilustrativo do problema completo.....	68
Figura 8: Mapa ilustrativo da solução obtida para o cenário base.....	68
Figura 9: Mapa ilustrativo da solução obtida para o cenário com α de 100%.....	75
Figura 10: Mapa ilustrativo da solução obtida para o cenário com α de 75%.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados dos centros de distribuição considerados no exemplo com dimensões reduzidas.....	48
Tabela 2: Dados das mesorregiões consideradas no exemplo com dimensões reduzidas.....	48
Tabela 3: Custo de transporte por faixa de peso (R\$/entrega) entre fornecedores e CDs.....	49
Tabela 4: Custo de transporte (R\$/por entrega) entre CDs e mesorregiões para clientes B2B.....	50
Tabela 5: Custo de transporte (R\$/por entrega) entre CDs e mesorregiões para clientes B2C.....	50
Tabela 6: Resultados obtidos no cenário base para o caso com dimensões reduzidas.....	51
Tabela 7: Resultados obtidos no cenário C1 para o caso com dimensões reduzidas.....	52
Tabela 8: Resultados obtidos no cenário C2 para o caso com dimensões reduzidas.....	53
Tabela 9: Tabela de custo de transporte por distância e peso transportado.....	56
Tabela 10: Dados levantados sobre os fornecedores.....	57
Tabela 11: Perfil de distribuição da quantidade demandada por pedido para clientes B2C.....	60
Tabela 12: Informações levantadas sobre os centros de distribuição.....	62
Tabela 13: Cálculo do fator de reajuste da distância.....	63
Tabela 14: Distâncias totais percorridas para entrega entre o fornecedor A e cada mesorregião com base no CD utilizado.....	69
Tabela 15: Parâmetros de custo fixo e variável considerados em cada cenário.....	71
Tabela 16: Comparação entre os resultados obtidos nos cenários Base, C1 e C2 e a situação atual.....	71
Tabela 17: Comparação entre os resultados obtidos nos cenários Base, C3 e C4 e a configuração atual da empresa.....	72
Tabela 18: Potencial de Economia por cenário testado.....	73
Tabela 19: Potencial de Economia por valor de α testado.....	74

LISTA DE SIGLAS

CD – Centro de Distribuição

B2B – *Business-to-Business*

B2C - *Business-to-Consumer*

FSMVRPTWSC – *Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Step Cost function*

HFVRPTWSD - *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Time Windows and Segmented Delivery*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA.....	19
2.1 Clientes da Cosméticos S.A	19
2.2 Modelo de operações da empresa	21
3 ESTUDO DO PROBLEMA	23
3.1 Importância do problema.....	23
3.2 Composição do custo logístico.....	23
3.2.1 Custo de operação dos centros de distribuição	24
3.2.2 Custo de transporte do fornecedor até o centro de distribuição.....	25
3.2.3 Custo de transporte do centro de distribuição até o cliente	27
3.2.4 Trade offs.....	28
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
4.1 Problemas de transporte e transbordo.....	29
4.2 Problemas de localização e alocação.....	30
4.3 Uso de parceiros logísticos.....	32
4.4 Modelos de custo escalonado.....	33
5 MODELAGEM DO PROBLEMA	37
5.1 Considerações sobre o problema	37
5.2 Formulação matemática	39
5.3 Descrição do modelo.....	42
6 RESOLUÇÃO DE UM CASO REDUZIDO.....	47
6.1 Dados utilizados.....	47
6.2 Resultados obtidos.....	50
6.3 Análise de sensibilidade	52
7 METODOLOGIA DE LEVANTAMENTO DE DADOS.....	55
7.1 Coleta de dados.....	55
7.1.1 Dados de custos de transporte.....	55
7.1.2 Dados dos fornecedores	57
7.1.3 Dados dos clientes.....	58
7.1.4 Dados dos centros de distribuição.....	61
7.2 Cálculo dos parâmetros de custo de transporte	62
7.2.1 Cálculo das distâncias a serem percorridas	63

7.2.2 Custo de transporte por faixa de peso no trecho fornecedor - CD.....	64
7.2.3 Custo de transporte no trecho centro de distribuição - cliente.....	64
8 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA.....	67
8.1 Solução obtida para o cenário base.....	67
8.2 Análise de sensibilidade para o cenário base	70
8.3 Análise do cenário futuro.....	73
8.4 Recomendações para a empresa.....	78
9 CONCLUSÃO.....	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
APÊNDICE A – MODELAGEM DO PROBLEMA EM CPLEX OPL.....	85
APÊNDICE B – PARÂMETROS DE ENTRADA PARA O CENÁRIO BASE DO CASO COMPLETO.....	88
APÊNDICE C – RESULTADOS OBTIDOS PARA TODAS AS VARIÁVEIS NO CENÁRIO BASE DO CASO COMPLETO	117

1 INTRODUÇÃO

O problema a ser abordado nesse trabalho de formatura envolve a definição da localização de um ou mais centros de distribuição (CD) e a alocação da demanda dos clientes aos CDs, de modo a minimizar os custos de logística de uma empresa do setor de cosméticos. Por questão de confidencialidade das informações, este trabalho se referirá a empresa como Cosméticos S.A.

O aluno entrou em contato com a empresa através da consultoria em que realiza estágio desde setembro de 2020. A consultoria foi contratada pela Cosméticos S.A. para, entre outros projetos, rever sua malha logística. O aluno não atuou nesse projeto em nenhum momento, porém se interessou pelo tema e optou por desenvolver seu trabalho de formatura com base nele, utilizando métodos de Pesquisa Operacional para a otimização da solução.

A Cosméticos S.A. é uma empresa brasileira que desenvolve produtos de beleza de alta qualidade, com sede no interior de São Paulo. A empresa não possui fabricação própria, terceirizando a fabricação dos produtos por ela desenvolvidos para seus fornecedores. Os produtos são então enviados pelos fornecedores para o centro de distribuição da Cosméticos S.A. que atualmente também se localiza no interior de São Paulo.

A partir deste centro de distribuição, os produtos são enviados para os clientes da Cosméticos S.A., que podem ser tanto consumidores finais no modelo *Business-to-Consumer* (B2C), quanto outras empresas, como lojas especializadas e salões de beleza, no modelo *Business-to-Business* (B2B). A empresa não possui uma frota própria, optando por terceirizar o serviço logístico, sendo as empresas contratadas as responsáveis por realizar a roteirização das entregas a partir do centro de distribuição.

Atualmente, a Cosméticos S.A. vende para todo o Brasil, porém a logística é um grande desafio para o atendimento da demanda, resultando em um custo elevado. Os custos logísticos da empresa representaram em 2020, aproximadamente 15% de sua receita, valor muito superior ao encontrado em empresas similares, um dos fatores que motivou a Cosméticos S.A. a contratar a consultoria para esse projeto. Para termos de comparação, (ILOS – Especialistas em Logística e *Supply Chain* – 2017) adota o valor de referência de 7,6% para a proporção entre custos logísticos e receita.

Desse modo, o espaço de análise do projeto é a revisão da malha logística da Cosméticos S.A., respondendo quantos CDs deveriam ser abertos e como a demanda deveria ser alocada entre eles.

O trabalho está estruturado em 9 capítulos, que abordam o contexto da empresa, a definição do problema, a revisão da bibliografia pertinente, os dados levantados, os modelos construídos e os resultados obtidos.

O Capítulo 2 contextualiza a situação atual da Cosméticos S.A., com foco nas informações relevantes para o problema a ser resolvido. É analisada a estratégia de negócios da empresa e sua relação com o modelo de operação logístico adotado.

No Capítulo 3 o problema abordado nesse trabalho é definido. Nele são apresentados os custos considerados, as decisões a serem tomadas, e a importância do problema para a Cosméticos S.A.

O Capítulo 4 traz uma revisão da literatura existente sobre os temas que embasam a solução proposta nesse trabalho. É dado destaque às bibliografias que abordam os problemas de transporte e transbordo, localização de centros de distribuição e escalonamento de custos.

No Capítulo 5 mostra-se a modelagem matemática desenvolvida para resolução do problema. São apresentados os conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão utilizadas, assim com a função objetivo e as restrições aplicadas.

O Capítulo 6 trata da resolução de um caso reduzido do problema, de modo a testar o modelo matemático desenvolvido por meio da análise da consistência dos resultados obtidos.

No Capítulo 7 é apresentada a metodologia utilizada para o levantamento de dados, assim como as premissas utilizadas para cálculo dos parâmetros de entrada do modelo.

O Capítulo 8 mostra a implementação do modelo matemático para o conjunto completo dos dados. Também são apresentados os resultados obtidos, que são comparados ao modelo atual da Cosméticos S.A.. Por fim, é realizada uma análise de sensibilidade dos parâmetros modelo, de modo a entender como a sua variação alteraria a solução proposta.

No Capítulo 9 são apresentadas as conclusões geradas no trabalho e as recomendações para a empresa com base nos resultados obtidos.

Por fim, no final do trabalho é reservado um espaço para a listagem das referências bibliográficas consultadas e para os apêndices, onde estão os programas computacionais desenvolvidos, o detalhamento das soluções obtidas e os dados utilizados na resolução do problema.

2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

Nesse capítulo, será realizada uma breve descrição da empresa selecionada para a realização desse trabalho. De modo a evitar que a identidade da empresa possa ser inferida, devido às questões de confidencialidade mencionadas no Capítulo Introdução, essa seção trará apenas as informações necessárias para que o leitor compreenda o problema abordado.

2.1 Clientes da Cosméticos S.A.

A Cosméticos S.A. é uma empresa brasileira que desenvolve produtos de beleza de alta qualidade, com sede no interior de São Paulo. O foco da empresa são itens destinados aos diferentes tipos de cabelo, oferecendo uma ampla variedade de shampoos, condicionadores, máscaras capilares, leave-ins, tinturas e produtos para alisamento. Além disso, a empresa também oferece produtos de maquiagem como batons, bases, sombras, blushes e corretivos, bem como linhas de tratamento para a pele.

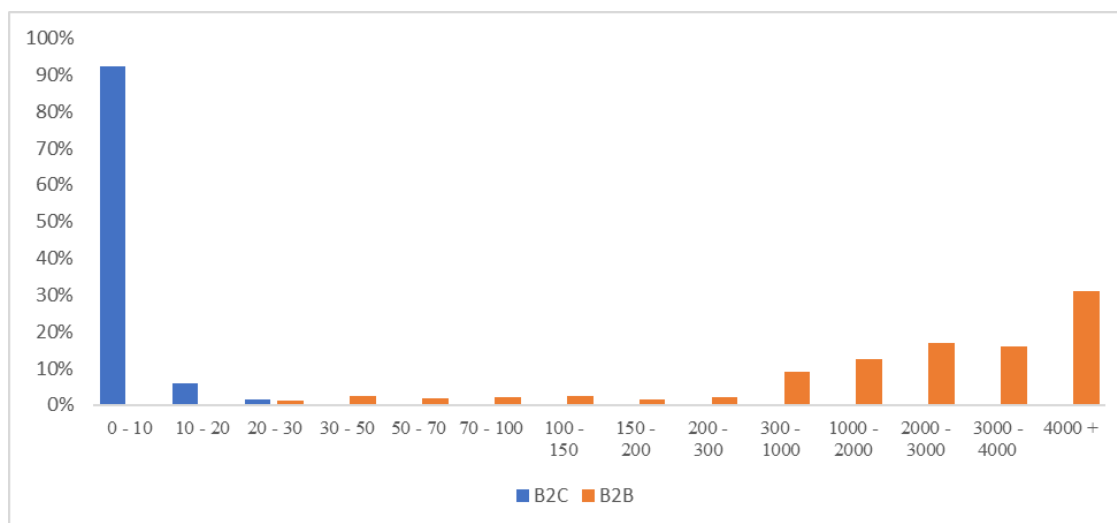
Além de vender seus cosméticos individualmente, a Cosméticos S.A. também oferece *kits* de produtos voltados para as necessidades de grupos específicos de clientes. Por exemplo, a empresa oferece um desconto no preço de compra de um pacote incluindo shampoos, condicionadores e tinturas para um tipo específico de cabelos.

Ao todo, o portfólio atual da empresa conta com 237 produtos diferentes, além de 193 *kits*. As vendas individuais representam 54,5% do total da empresa, com os *kits* representando os demais 45,5%. Essa proporção, assim como as demais que serão apresentadas nesse trabalho, foi calculada com base no peso dos produtos, informação que foi passada pela empresa para o aluno.

A empresa vende esses produtos e *kits* tanto diretamente para consumidores finais (modelo B2C) quanto para outras empresas, como lojas especializadas e salões de beleza (modelo B2B). Ambos os grupos de clientes são relevantes para a Cosméticos S.A., com o modelo B2C representando 62,9% das vendas da empresa em 2020 e o modelo B2B correspondendo aos 37,1% restantes.

É interessante notar que os tipos de clientes apresentam perfis de demanda bastante diferentes, como mostra a Figura 1, que traz a frequência em que o pedido de cada tipo de cliente se encontra em cada faixa de peso. Percebe-se que as vendas no modelo B2B apresentam, em média, um peso por pedido muito superior em comparação às no modelo B2C (2976,9 kg contra 4,7 kg).

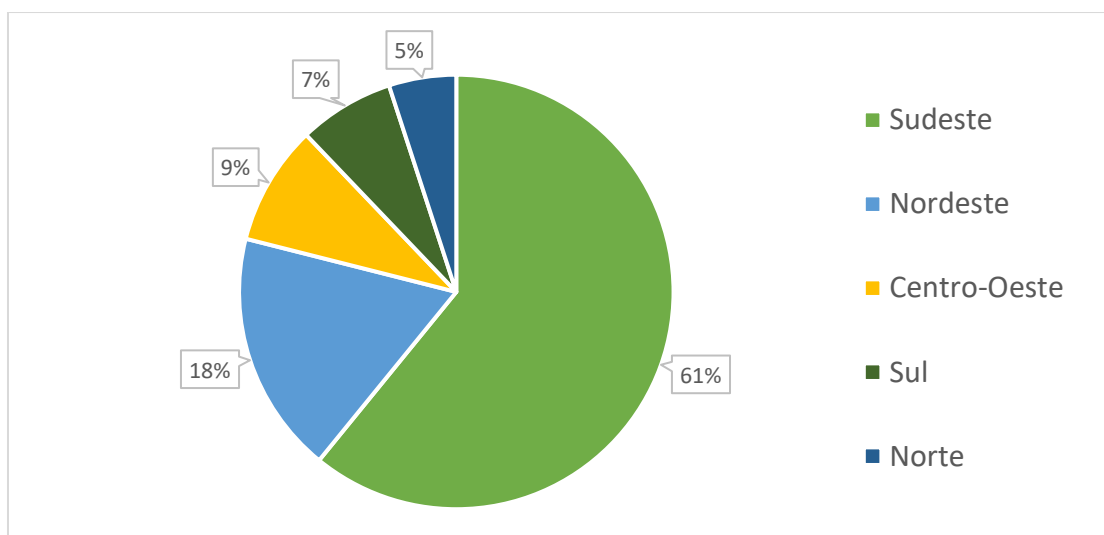
Figura 1: Distribuição da faixa de peso por pedido para cada tipo de cliente



Fonte: Elaboração própria

Outro aspecto relevante é que, atualmente, as vendas da empresa estão muito concentradas na região Sudeste, que é de longe o principal mercado da Cosméticos S.A., representando 60,9% das vendas da empresa. Em seguida vem o Nordeste (18,1%), Centro-Oeste (8,9%), Sul (7,1%) e Norte (5,0%), como pode ser visto na Figura 2. Essa concentração se explica muito pela participação do estado de São Paulo, que sozinho representa 46,6% do total.

Figura 2: Distribuição das vendas da Cosméticos S.A. por região



Fonte: Elaboração própria

2.2 Modelo de operações da empresa

A Cosméticos S.A. construiu, ao longo dos anos de operação, uma *expertise* em pesquisa e desenvolvimento (P&D), sendo esse seu principal diferencial competitivo. Em linha com suas competências, o modelo de negócios da Cosméticos S.A. busca minimizar a necessidade de investimentos em suas operações, terceirizando todas as atividades não consideradas essenciais, de modo a permitir que a empresa possa focar seus recursos no desenvolvimento de novos produtos.

Como exemplo desse modo de operação, a empresa optou por terceirizar a produção dos cosméticos por ela desenvolvidos. Os fornecedores selecionados fabricam os produtos e os enviam semanalmente para o CD da Cosméticos S.A., que atualmente se localiza no estado de São Paulo, a partir do qual são distribuídos para os clientes da empresa.

Ainda em linha com essa estratégia, a empresa não possui lojas físicas próprias para a comercialização de seus produtos, optando por vender através de outros canais de distribuição. Dentre eles se destacam:

- E-commerce operado em site próprio que atende o Estado de São Paulo;
- Rede de parceiros - que podem ser tanto lojas especializadas em cosméticos, quanto pessoas físicas que atuam como distribuidores autorizados - para revender seus produtos em todo o Brasil;
- Vendas para salões de beleza, que utilizam os produtos da Cosméticos S.A. nos serviços prestados aos seus consumidores.

Para realizar as entregas a Cosméticos S.A. contrata o serviço logístico de outras empresas, tanto para vendas B2B, quanto B2C. As empresas contratadas são responsáveis por buscar os produtos no centro de distribuição da empresa e levá-los até os clientes. A roteirização das entregas também é realizada pelas empresas contratadas, sem que a Cosméticos S.A. interfira nesse processo.

Nos últimos anos, a Cosméticos S.A. vem buscando aperfeiçoar seu modelo de comercialização, de modo a acelerar o seu crescimento, sendo o lançamento do *e-commerce* próprio uma das iniciativas priorizadas em sintonia com essa estratégia. No entanto, a empresa entende que ainda há necessidade de evolução nessa frente, sendo a expansão da cobertura do *e-commerce* para o restante do país, uma de suas prioridades. Esse movimento visa aumentar

sua penetração nos demais estados, pois, como visto na Seção 2.1, São Paulo corresponde a quase metade das vendas da empresa.

A revisão da malha logística é de fundamental importância para essa expansão, de modo a garantir que os custos associados à essas entregas não inviabilizem o modelo de negócio da empresa. Em 2020, os custos logísticos da Cosméticos S.A. representam cerca de 15% de seu faturamento, sendo essa proporção aproximadamente o dobro do valor de referência adotado para empresas similares no Brasil, que é de 7,6% (ILOS – Especialistas em Logística e *Supply Chain* – 2017).

Essa alta representatividade dos custos logísticos é, em parte, explicada pelo alto custo da operação no modelo B2C, que envolve o transporte de cargas muito pequenas, cujo custo de transporte unitário é superior, como será discutido no Capítulo 3. Apesar disso, a magnitude dessa diferença evidencia a importância da otimização da malha logística da empresa, como uma alavanca para aumento de sua margem de lucro.

3 ESTUDO DO PROBLEMA

Esse capítulo define o problema abordado nesse trabalho, delimitando o escopo do que será analisado. Será discutida a importância do problema para a empresa e a composição do custo logístico a ser minimizado.

3.1 Importância do problema

A Cosméticos S.A., uma empresa do setor de cosméticos, deseja rever sua malha logística. Atualmente a empresa opera com um único CD localizado no interior do Estado de São Paulo, no qual ela recebe os produtos de seus fornecedores e redistribui para os seus clientes em todo o Brasil, que podem ser tanto pessoas físicas (modelo B2C) quanto empresas (modelo B2B).

Visando reduzir seu custo logístico e dar suporte ao crescimento acelerado previsto para os próximos anos, a empresa cogita utilizar novos centros de distribuição, tendo definido os estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco e Espírito Santo como os principais candidatos para a localização dos novos CDs.

O problema a ser resolvido consiste em determinar quantos e quais centros de distribuição (CD) serão abertos, assim como quais clientes serão atendidos por cada CD, de modo a minimizar o custo logístico da empresa. Os CDs serão selecionados dentro de uma lista de possíveis candidatos, que inclui o CD atual em SP, assim como as demais localidades selecionadas pela Cosméticos S.A.

Essa redução de custos é fundamental para viabilizar a estratégia de expansão da empresa, garantindo a viabilidade financeira de sua operação, para vendas em todo o território nacional. A importância é ainda maior devido a representatividade dos custos logísticos, que representaram em 2020 cerca de 15% do faturamento da empresa.

Cabe ressaltar que, por estar planejando uma expansão significativa para os próximos anos, a Cosméticos S.A. deseja uma solução que seja adequada tanto para a situação atual quanto para o futuro, considerando o crescimento projetado da demanda.

3.2 Composição do custo logístico

Para ser capaz de minimizar o custo logístico é preciso inicialmente entender como ele é composto no contexto da Cosméticos S.A. De acordo com as informações coletadas junto a

empresa, os custos envolvidos no processo logístico da empresa podem ser agrupados em 3 principais elementos:

- Custo de operação dos centros de distribuição;
- Custo de transporte dos produtos do fornecedor até o CD
- Custo de transporte dos produtos do CD até os clientes;

Para além dos custos mencionados acima, a revisão da malha logística pode levar a uma diminuição nas despesas tributárias da empresa. Por exemplo, existem estados e municípios que oferecem incentivos fiscais para instalação de centros de distribuição na região. O gasto com ICMS também pode ser reduzido, aproveitando as diferentes regras de tributações para vendas entre estados. A importância da questão fiscal para decisões referentes a malha logística de organizações no cenário brasileiro é analisada em Yoshizaki (2002). No entanto, apesar da relevância desse fator, não foi possível incorporá-lo a modelagem proposta, pois a empresa não disponibilizou para a realização desse trabalho informações sobre os preços dos produtos vendidos, o que inviabiliza o cálculo das despesas de ICMS que são função deles. Sendo assim, a modelagem a ser desenvolvida não considerará o impacto sobre as despesas fiscais na definição da malha logística da Cosméticos S.A.

Nas próximas seções se detalhará como cada um dos demais elementos de custo é formado, considerando o processo logístico da Cosméticos S.A.

3.2.1 Custo de operação dos centros de distribuição

O custo de operação dos centros de distribuição é composto por uma ampla gama de gastos necessários para que o CD possa operar. Entre eles podem ser citados:

- Custo de aluguel, já que a Cosméticos S.A. tem como estratégia não comprar ou construir os CDs de modo a minimizar o investimento necessário e ter maior facilidade de alterar sua malha logística no futuro;
- Custo da mão de obra dos funcionários que trabalham no centro de distribuição. Esses trabalhadores realizam atividades como inspeção das mercadorias, *order picking* (recolher no armazém os produtos que compõe o pedido de cada cliente), embalagem, carga e descarga dos veículos;
- Custo de operação/manutenção dos equipamentos utilizados no CD como porta *pallets*, estantes e empilhadeiras;
- Custo com água e energia consumidos pelo centro de distribuição.

Esses custos podem ser classificados em fixos (que serão constantes, independentemente da quantidade de produtos movimentada no Centro de Distribuição), e variáveis (que são função da quantidade movimentada). No primeiro grupo, podem ser citados o aluguel, água e energia, que serão aproximadamente constantes, desde que a quantidade movimentada não ultrapasse a capacidade máxima do CD. Já o custo de pessoal e o custo de operação/manutenção podem ser considerados exemplos do segundo grupo, pois quanto maior a quantidade movimentada mais pessoas e equipamentos serão necessários.

Outro ponto importante, é que esses custos variam em função da localização escolhida para o centro de distribuição. Por exemplo, a operação de um centro de distribuição na capital de um estado provavelmente terá um custo mais elevado do que a de um outro com as mesmas características no interior, devido a, entre outros fatores, um aluguel mais caro por m² e uma mão de obra com remuneração média superior. Pelos mesmos motivos, podem existir diferenças significativas entre os estados candidatos, fator importante a ser considerado na decisão de qual centro de distribuição abrir.

Cabe ressaltar ainda que os centros de distribuição têm uma capacidade limitada de expedição e armazenagem de mercadorias, sendo necessário garantir que a demanda atendida por cada CD respeite essa restrição.

3.2.2 Custo de transporte do fornecedor até o centro de distribuição

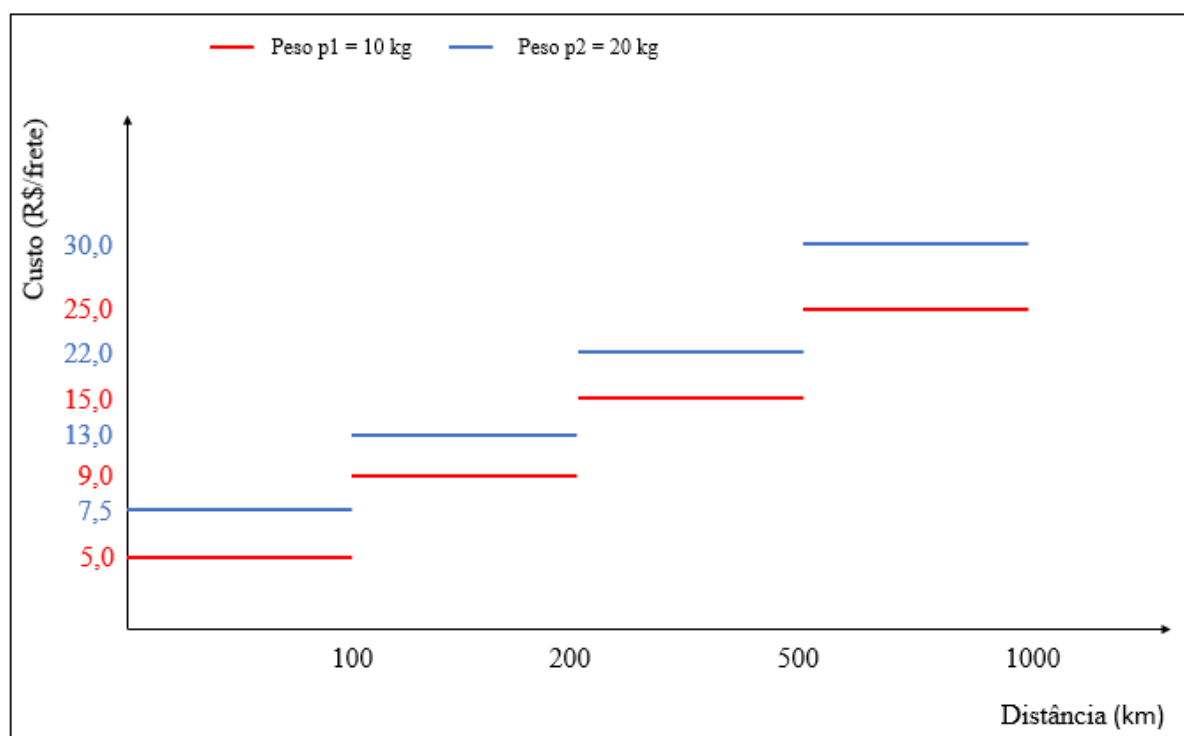
Atualmente a Cosméticos S.A. conta com 6 fornecedores, sendo que os 3 mais significativos representaram 96% das suas entregas no ano de 2020. No entanto, cada um deles fornece uma composição (mix) diferente de produtos, de modo que qualquer CD em operação aberto terá que receber produtos de todos os fornecedores para ser capaz de atender a demanda completa dos clientes. Pela mesma razão, a quantidade recebida de cada um deles deverá respeitar à proporção que o mix de produtos daquele fornecedor representa da demanda total.

Cabe ressaltar, que no caso da Cosméticos S.A., os fornecedores são responsáveis pelo transporte de seus produtos para o centro de distribuição da empresa. No contexto atual, em que todos os fornecedores estão localizados próximos ao CD da empresa esses custos não são relevantes, porém, caso a empresa decida abrir centros de distribuição em outros estados o custo do transporte pode se tornar bastante significativo. Apesar de a Cosméticos S.A. não arcar diretamente com esses valores, eles não podem ser ignorados na análise do custo logístico total, já que serão repassados pelos fornecedores indiretamente no custo de seus produtos. Desse

modo, para os fins desse problema, o transporte de produtos do fornecedor para o CD será tratado como se fosse um custo da Cosméticos S.A.

Para o transporte de mercadorias, seja entre fornecedor e centro de distribuição ou entre CD e cliente, o custo por entrega é cobrado por parte das transportadoras com base no peso transportado e na distância percorrida. A função que determina esse custo é ilustrada pela Figura 3 (com valores fictícios e fora de escala).

Figura 3: Relação entre custo por frete, peso transportado e distância percorrida



Fonte: Elaboração própria

A Figura 3 mostra que, para maiores distâncias, o custo do frete é maior para um dado peso. De forma análoga, o aumento da quantidade transportada gera um custo por frete superior para uma mesma distância.

É importante notar que, o custo por entrega cresce a uma taxa inferior ao aumento da distância percorrida e do peso transportado, mantida fixa a outra variável. Por exemplo, mantendo a distância constante, e dobrando o peso a ser transportado, o custo tende a crescer em uma razão inferior a 2. Desse modo, costuma ser mais barato enviar, para um mesmo trajeto, uma única carga com 50 kg do que 5 entregas, cada uma com 10 kg.

Outra característica importante da relação entre o valor do frete, a quantidade transportada e a distância percorrida é que o aumento do custo por entrega não se dá de forma

contínua. Na prática da Cosméticos S.A., esse custo segue uma função escalonada, permanecendo constante para um determinado intervalo de valores de suas variáveis e se alterando ao sair dessas faixas.

Como consequência do modelo de precificação do custo por frete, temos que o custo total de transporte entre um fornecedor e um centro de distribuição em um determinado intervalo de tempo, não dependerá apenas da localização dos envolvidos e da quantidade total transportada no período, mas também do peso transportado em cada viagem. Quanto maior essa quantidade, para uma dada distância, menor será o custo por unidade transportada, de modo que, considerando exclusivamente o custo de transporte, o ideal seria ter a menor frequência de envios possível, com maior volume em cada uma delas. No entanto, como será discutido na Seção 3.2.4, essa decisão traria outras consequências negativas que precisam ser analisadas.

3.2.3 Custo de transporte do centro de distribuição até o cliente

Como a estratégia de comercialização da Cosméticos S.A. não envolve o uso de lojas próprias, os produtos são enviados diretamente do centro de distribuição da empresa, atualmente localizado em São Paulo, para os seus clientes que estão espalhados por todo o Brasil. A empresa opera tanto no modelo B2C, com vendas diretamente para os consumidores finais (modelo B2C), quanto no modelo B2B, com vendas para outras empresas, como salões de beleza e lojas de revenda especializadas. Nesse último caso, os clientes adquirem em média, quantidades maiores dos produtos a cada compra.

O transporte dos produtos dos centros de distribuição para os clientes é terceirizado para empresas especializadas em logística. As empresas contratadas cobram por esse serviço, de acordo com suas próprias tabelas de custo. Conforme discutido na Seção 3.2.2, o custo por frete cresce de forma não linear em relação ao aumento da quantidade transportada e da distância percorrida, de modo que transportar uma quantidade menor por viagem leva a um custo total maior para uma mesma quantidade total de produtos. No contexto atual, a Cosméticos S.A. tem pouca margem de manobra para reduzir seu custo de transporte através do aumento da quantidade movimentada por viagem, já que as transportadoras são responsáveis por realizar a roteirização do transporte e cobram por cada entrega individualmente.

É importante notar que, devido ao custo variar em função da quantidade transportada, há uma diferença entre os clientes B2B, (que demandam, em média, uma quantidade maior por pedido) e os clientes B2C, que deve ser levada em consideração na modelagem do problema.

3.2.4 Trade offs

Para definir a estratégia logística da empresa que minimize seus custos, é fundamental que todos os elementos considerados sejam analisados em conjunto. Definir uma solução que seria a ideal, levando em consideração apenas um tipo de custo, pode levar a uma solução global insatisfatória, já que existem *trade-offs* relevantes entre eles.

Um primeiro *trade off* diz respeito a quantidade de centros de distribuição que devem ser abertos. Do ponto de vista do custo de transporte, a abertura de mais CDs é vantajosa, pois permite uma melhor distribuição no território nacional, reduzindo a distância até os clientes a serem atendidos, e, conseqüentemente o custo. Essa estratégia também resultaria em um menor *lead time* para a entrega, aumentando o nível de satisfação dos clientes. Porém, adotar essa estratégia aumenta os custos de operação dos CDs, pois a parcela fixa desse custo cresce com a quantidade de CDs abertos.

A localização de cada centro de distribuição é outra decisão que gera *trade offs*. Caso seja posicionado em uma grande região metropolitana, eles terão um custo de operação maior, conforme comentado na Seção 3.2.1. Por outro lado, como nessas cidades há uma maior concentração populacional, a demanda tenderá a ser maior e assim, ao se posicionar nesse local é possível reduzir o custo de transporte na etapa CD - cliente.

Por fim, um terceiro *trade off* relevante diz respeito à quantidade recebida dos fornecedores por entrega. Por um lado, o aumento desse valor reduzirá o custo de transporte no trecho fornecedor – CD, mas por outro o estoque médio da Cosméticos S.A. irá aumentar, o que se refletirá em um aumento do custo de estocagem. A resolução desse dilema é um problema clássico da gestão de estoques, que foge do escopo desse trabalho. Desse modo, para fins da modelagem a ser realizada, se assumirá que a política de estoques da Cosméticos S.A. é ótima, e, sendo assim, que a frequência de entrega atual será mantida. Caso a empresa no futuro deseje rever a sua política de estoques, isso poderá ser feito de forma independente ao modelo, e o novo valor de frequência de entregas de cada fornecedor passará a ser considerado.

Devido à existência dos *trade offs* acima, a modelagem a ser adotada nesse trabalho considerará todos os custos envolvidos simultaneamente.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma revisão da bibliografia existente no que se refere a problemas de transporte e transbordo, localização de centros de distribuição e modelagens para tratamento de custos escalonados.

O entendimento do que já existe na literatura sobre esses temas embasará a construção da modelagem matemática do problema e sua resolução.

4.1 Problemas de transporte e transbordo

Os problemas de transporte são clássicos da pesquisa operacional, e envolvem a otimização do deslocamento de cargas entre pontos de oferta ou origem (que podem enviar produtos, mas não podem recebê-los) e pontos de demanda ou consumo (que podem receber produtos, mas não podem enviá-los). A modelagem busca encontrar o meio mais eficiente de atender os pontos de demanda a partir dos pontos de oferta. Cabe ressaltar que eficiência pode assumir diferentes significados dependendo do contexto, como menores distâncias ou menores custos. A formulação clássica para esse problema, nos casos em que a oferta global é igual à demanda global, é apresentada em Arenales et al., (2007).

Supondo que existam m pontos de origem, cada um com oferta a_i , e n pontos de destino com demanda d_j , sendo que o custo de transportar uma unidade do ponto de origem i para o destino j seja c_{ij} . Define-se então a variável x_{ij} como a quantidade transportada do ponto de origem i para o ponto de destino j . Tem-se então o seguinte modelo matemático.

$$\text{Min: } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

S.a.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_i, \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (4)$$

Os problemas de transbordo se diferenciam dos problemas de transporte, por considerarem a existência de pontos intermediários, que tanto recebem quanto enviam produtos, denominados pontos de transbordo (WINSTON, 2004). A resolução desse tipo de problema já

é bem estabelecida na literatura de Pesquisa Operacional, sendo o modelo clássico apresentado a seguir.

Considere-se uma rede orientada $G = (N, A)$, em que $N = \{1, \dots, n\}$ é o conjunto de nós e $A = \{(i, j)\}$ é o conjunto de arcos orientados. Para cada nó i dessa rede, define-se o parâmetro b_i , que representa a oferta (caso $b_i > 0$), ou menos a demanda (caso $b_i < 0$). Se $b_i = 0$, o nó i é um ponto de transbordo puro. De forma análoga ao problema de transporte acima mencionado, a cada arco (i, j) dessa rede está associado um parâmetro c_{ij} , que representa o custo unitário de transporte. As variáveis de decisão são x_{ij} , quantidade transportada no arco (i, j) .

$$\text{Min: } \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (5)$$

S.a.

$$\sum_{j:(i,j) \in A} x_{ij} - \sum_{k:(k,i) \in A} x_{kj} = b_i, \quad i \in N \quad (6)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad (i, j) \in A \quad (7)$$

No problema abordado nesse trabalho, os fornecedores se comportam como pontos de oferta, os clientes são pontos de demanda e os centros de distribuição são pontos de transbordo. No entanto em um caso clássico de problemas de transporte e transbordo o único custo considerado é um custo variável de transporte, o que não reflete a realidade do caso analisado. No contexto da Cosméticos S.A. os pontos de transbordo (CDs) apresentam custos fixos e variáveis de operação, de modo que pode não ser do interesse da empresa abri-los.

Sendo assim, o caso abordado nesse trabalho se aproxima mais de um problema de localização e alocação.

4.2 Problemas de localização e alocação

Nesse trabalho a localização dos centros de distribuição e a alocação da demanda entre eles é um tema central. Esse também é uma problema clássico dentro da Pesquisa Operacional, com inúmeras aplicações tanto no setor privado quanto no público. Como exemplos, podem ser citados a decisão de onde instalar plantas fabris e depósitos para indústrias, onde abrir lojas para empresas de varejo e onde localizar de hospitais, escolas e estações de bombeiros para governos (KLOSE; DREXL, 2005).

Ainda de acordo com Klose e Drexler (2005), para resolver esses problemas, existe na literatura uma ampla gama de modelos, para atender as necessidades de cada aplicação que podem ser bastante diferentes. Esses modelos variam muito em sua complexidade, desde problemas lineares e determinísticos até problemas não lineares e probabilísticos.

Ghiani; Laporte e Musmanno (2004) discutem em que esfera de uma organização devem ser tomadas as decisões referentes à logística. Questões de localização de instalações são estratégicas, na visão dos autores, quando envolvem a aquisição de recursos custosos como plantas, depósitos e equipamentos, pois tem efeitos de longo prazo. Porém, em casos em que os gastos necessários não são tão significativos elas podem ser tomadas a nível tático, por poderem ser revertidas no médio prazo caso necessário.

As referências acima descrevem as diversas situações reais que envolvem decisões de localização, e como elas devem ser tomadas. Para entender o que define esse tipo de problema, no entanto, é preciso conhecer os 4 componentes que os caracterizam (REVELLE; EISELT, 2005).

1. Os clientes, que, por premissa, se assume já estarem localizados.
2. As instalações a serem localizadas.
3. Um espaço onde estão localizados os clientes e as instalações.
4. Um conjunto de valores que mensure a distância ou tempo entre cada par cliente e instalação.

Para além desses elementos comuns a todos os problemas de localização, é importante entender as principais diferenças entre eles, de modo a entender onde se enquadra o caso tratado nesse trabalho.

Uma primeira classificação importante se refere ao espaço da solução, que pode ser contínua (o objeto a ser posicionado pode se situar em qualquer local do plano ou rede considerados) ou discreta (o posicionamento é restrito a alguns pontos candidatos), como mostram ReVelle e Eiselt (2005). Nesse trabalho o problema abordado é do tipo discreto, com um conjunto de locais tendo sido selecionados previamente pela empresa.

Ainda de acordo com os autores, outra distinção importante diz respeito ao objetivo buscado no problema, que pode apresentar diversas variações. No entanto, em sua maioria são ou do tipo mínimo-soma (se busca minimizar alguma soma, como por exemplo o tempo total de deslocamento para atender a todos os clientes) ou mínimo-máximo (que tem por objetivo

minimizar algum máximo, como por exemplo a maior distância entre um cidadão e um posto de bombeiros em uma cidade). No contexto desse trabalho, tem-se um problema de mínimo-soma, com o objetivo de minimizar o custo de transporte da Cosméticos S.A.

Outras diferenças importantes são abordadas por Klose e Drexel (2005), como:

- Problemas com ou sem restrição de capacidade. No caso da Cosméticos S.A. existem restrições de capacidade em cada centro de distribuição a serem consideradas;
- Problemas com um único estágio ou múltiplos estágios de fluxo de materiais. No contexto desse trabalho há dois estágios de fluxo a serem analisados, um do fornecedor ao centro de distribuição e um segundo do CD até o cliente;
- Problemas com um único tipo de produto ou múltiplos produtos. No modelo construído, os diversos cosméticos produzidos pela empresa são tratados como um único produto, agrupados em função de seu peso;
- Problemas com demanda elástica ou inelástica em relação à distância do cliente para a instalação. Para o caso da Cosméticos S.A., a premissa adotada é de uma demanda inelástica;
- Modelos estáticos (tentam otimizar a performance para um período representativo) ou dinâmicos (os parâmetros de entrada variam para o horizonte de tempo considerado). No problema abordado nesse trabalho, será utilizado um modelo estático;
- Dados de entrada determinísticos ou probabilísticos. Esse trabalho considerará dados de entrada determinísticos, o que reforça a necessidade de uma análise de sensibilidade para levar em consideração a incerteza inerente às informações levantadas;
- Modelos com funções objetivos, com um único objetivo ou com múltiplos objetivos. No caso abordado nesse trabalho, há um único objetivo, minimizar o custo total de transporte da empresa.

4.3 Uso de parceiros logísticos

Conforme discutido no Capítulo 3 a Cosméticos S.A. utiliza parceiros logísticos para transportar seus produtos. A terceirização da logística (3PL na sigla em inglês) não é uma

novidade na literatura, nem no cotidiano das organizações. Essa abordagem permite a empresa focar em seu *core business*, aproveitar a disponibilidade e flexibilidade oferecida por um parceiro especializado e ter custos previsíveis de acordo com contratos pré-estabelecidos (MANGUINO, 2020).

Uma ampla revisão da literatura sobre o uso de parceiros logísticos foi realizada por Marasco (2008). Nessa pesquisa o autor analisou 152 artigos publicados em 33 revistas de grande impacto entre os anos de 1986 e 2016, incluindo tanto abordagens teóricas quanto empíricas. Os resultados obtidos comprovam o aumento da importância do 3PL ao longo dos anos, em especial com o crescimento do e-commerce.

Pesquisas empíricas também demonstram a importância do uso de parceiros logísticos. Uma delas realizada nos Estados Unidos em 2004 revelou que 80% das indústrias do país recorriam a essa modalidade (LIEB; BENTZ, 2005). Mais recentemente, nova pesquisa apontou que a receita anual das empresas dedicadas ao transporte de mercadorias estava na casa dos US\$ 700 bilhões (LIEB; LIEB, 2015).

4.4 Modelos de custo escalonado

Como visto na seção anterior, o problema a ser resolvido é um exemplo típico de problemas de locação-alocação. No entanto há um elemento complicador importante que o diferencia dos casos clássicos, que é o fato de os custos de transporte não serem lineares em função da distância percorrida e da quantidade transportada. Como discutido no Capítulo 3, no contexto da Cosméticos S.A. nas tabelas de custo de transporte das empresas contratadas, o valor do frete varia em faixas em função dessas variáveis.

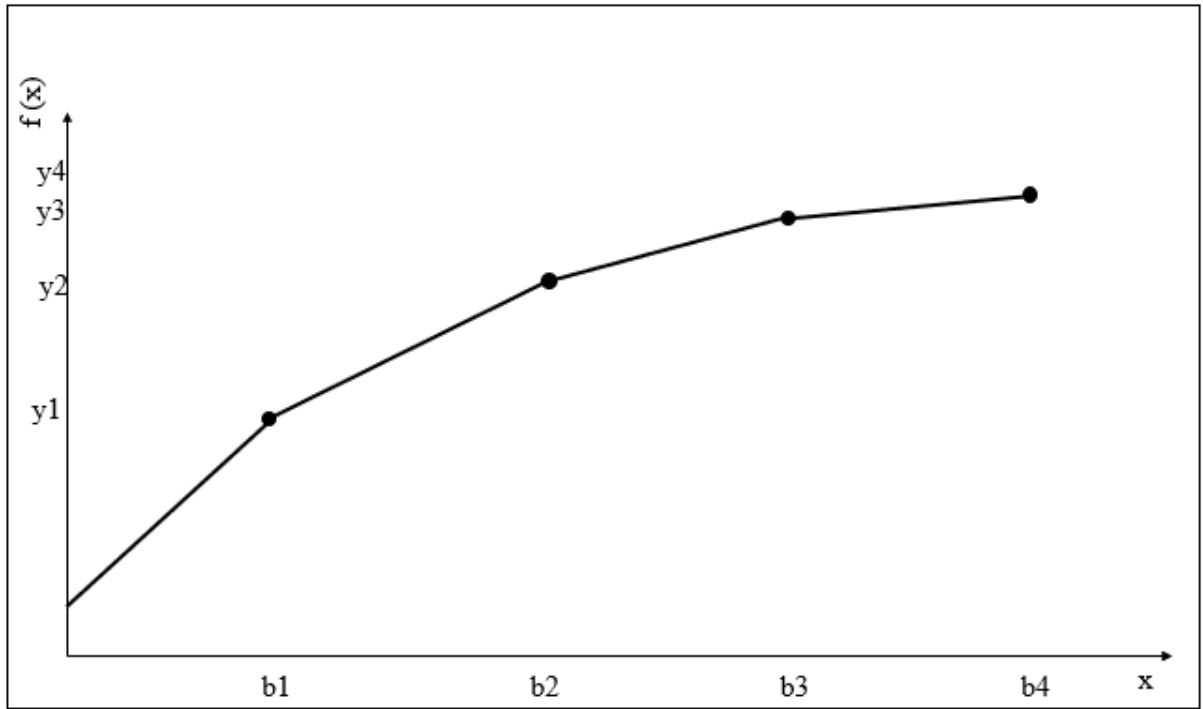
Winston (2004) apresenta uma forma de modelar com programação lineares problemas com funções de custo de transporte contínuas que sejam lineares por partes, como a apresentada na figura 4. O autor propõe particionar a função $f(x)$, calculando seu valor nos M pontos de quebra (b_i no exemplo abaixo) e para pontos intermediários interpolar a função entre os pontos b_i e b_{i+1} . Para exemplificar a proposta do autor, considere-se um ponto x' entre b_i e b_{i+1} . Para algum valor de z ($0 \leq z \leq 1$), x' pode ser escrito como:

$$x' = z_i b_i + (1 - z_i) b_{i+1} \quad (8)$$

Dado que $f(x)$ é linear entre 0 n_i e n_{i+1} , é possível escrever que:

$$f(x') = z_i f(n_i) + (1 - z_i) f(n_{i+1}) \quad (9)$$

Figura 4: Exemplo de função contínua linear por partes



Fonte: Elaboração própria

Desse modo, é possível linearizar a função $f(x)$, escrevendo-a como mostrado na Equação (10) e acrescentando as Restrições (11) a (18):

$$f(x) = \sum_{i=1}^M z_i f(b_i) \quad (10)$$

$$z_i \leq y_{i-1} + y_i \quad i = 2, \dots, M-1 \quad (11)$$

$$z_1 \leq y_1 \quad (12)$$

$$z_M \leq y_{M-1} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{M-1} y_i = 1 \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^M z_i = 1 \quad (15)$$

$$x_i = \sum_{i=1}^M z_i b_i \quad (16)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, \dots, M-1 \quad (17)$$

$$z_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, M \quad (18)$$

No entanto, a solução proposta por Winston (2004) é válida apenas para funções que são contínuas nos pontos de quebra, o que não ocorre para funções com custos escalonados como a tratada nesse trabalho.

Ghiani; Laporte e Musmanno (2004), discutem diferentes formas para o cálculo do custo de transporte, diferenciando os casos em que a empresa é dona da frota de veículos utilizados, se os aluga ou se contrata um operador logístico, que é o caso da empresa analisada. Entre os tipos de custo discutidos se encontra o frete escalonado em função do peso transportado.

Manguino e Ronconi (2021) apresentam uma abordagem específica para situações em que empresas contratam companhias logísticas terceiras, cuja cobrança é feita com base em funções escalonadas descontínuas. No caso analisado a empresa contratante tem a liberdade de definir a roteirização das entregas, e pode utilizar os diversos tipos de veículos presentes na frota da contratada para atender a demanda de seus clientes em janelas de tempo definidas. Caracteriza-se assim um problema de tamanho de frota e mix de veículos roteirização e com janelas de tempo e funções de custo descontínuas, denominada FSMVRPTWSC pelos autores. Esse artigo expande o que havia sido desenvolvido em Manguino (2020).

Outro exemplo de aplicação de modelos de custo escalonado pode ser encontrado em Bassi (2009). Esse caso trata de um problema de roteamento de uma frota heterogênea de veículos com janelas de tempo e entregas parciais (HFVRPTWSD) com custos escalonados em função da distância para coleta de materiais para obras em uma empresa de construção civil.

Elementos dessas referências foram adaptados para a modelagem proposta neste trabalho, que tem como diferencial trabalhar com custos escalonados em função do peso e não da distância.

5 MODELAGEM DO PROBLEMA

Este capítulo é dedicado à modelagem matemática. Em um primeiro momento, serão feitas considerações sobre o problema, a luz da definição realizada no Capítulo 3 e das referências bibliográficas discutidas no Capítulo 4. Em seguida será mostrada a formulação matemática construída para otimizar a solução do problema proposto.

Cabe ressaltar que, para abordar o problema descrito, foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira mista (PLIM), para seleção dos centros de distribuição a serem abertos e alocação de demanda dos clientes, agrupados em mesorregiões a esses CDs.

5.1 Considerações sobre o problema

A operação logística da Cosméticos S.A. utiliza centros de distribuição para receber os produtos de seus fornecedores e enviá-los para seus clientes espalhados por todo o território nacional. Esse trabalho tem por objetivo encontrar a configuração da malha logística de empresa que minimize seu custo. Para isso, a modelagem a ser desenvolvida deve responder as seguintes questões:

- Quantos centros de distribuição serão abertos e em quais localizações?
- Qual dos CDs abertos será responsável por atender os pedidos de cada cliente?
- Qual a quantidade total (e por entrega) a ser movimentada entre cada par fornecedor – centro de distribuição?
- Qual a quantidade de pedidos a ser movimentada entre cada par centro de distribuição – cliente no modelo B2B?
- Qual a quantidade de pedidos a ser movimentada entre cada par centro de distribuição – cliente no modelo B2C?

Cabe ressaltar que, devido ao elevado número de clientes da Cosméticos S.A., foi necessário para a modelagem matemática do problema trabalhar com uma demanda mais agregada. Desse modo, os clientes foram agrupados com base em sua mesorregião, divisão geográfica do Brasil que abrange um grupo de municípios dentro de um mesmo estado (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); 1990). Foi adotada como premissa na modelagem, que cada mesorregião será atendida por um único centro de distribuição.

As decisões acima mencionadas afetarão os três componentes do custo logístico considerados no problema, o que deve se refletir em sua formulação matemática.

O custo de operação do centro de distribuição é dividido nessa modelagem em uma parcela fixa e outra variável, ambas associadas a cada CD específico. O total do valor fixo será gasto caso a decisão tomada seja abrir aquele candidato (caso o candidato a CD não seja aberto, ele não representará nenhum custo para a empresa). Já o valor variável será proporcional à quantidade, em kg, movimentada naquele CD.

Os custos de transportes (tanto do fornecedor para o centro de distribuição, quanto do CD para o cliente) serão modelados como a multiplicação entre o custo por entrega e a quantidade de entregas realizadas, ambos calculados para cada percurso. O custo por entrega é determinado pelos valores de distância a ser percorrida e a quantidade movimentada na entrega específica. Conforme discutido no Capítulo 3, esses valores não variam de forma contínua, mas sim em faixas.

Para o trecho CD – cliente a quantidade transportada por viagem foi calculada utilizando dados históricos para cada mesorregião, conforme será detalhado no Capítulo 7. Com a adoção dessa premissa, ambos os fatores que determinam o custo por pedido (distância percorrida e quantidade transportada por entrega) não dependem da solução calculada pelo modelo, de modo que esse será um parâmetro de entrada.

Cabe ressaltar que, na agregação da demanda em mesorregiões, os dados dos clientes no modelo B2B e B2C foram mantidos separados, o que será importante para a modelagem do problema já que a quantidade média demandada por cada um deles é diferente, o que implica que seu custo de transporte por entrega também será diferente entre os grupos de clientes.

Já para o trecho fornecedor - CD, a quantidade movimentada por entrega não pode ser um parâmetro de entrada do modelo. De acordo com as informações levantadas junto a Cosméticos S.A., a política de estoque da empresa prevê que os fornecedores realizem entregas semanais. Desse modo, a quantidade por entrega não é fixa, ela depende do total a ser movimentado no período. Para que o problema a ser resolvido reflita essa realidade, o custo por entrega precisará ser determinado no próprio modelo.

Vale notar que, todos os centros de distribuição precisam receber entregas de todos os fornecedores, conforme à proporção que cada um deles representa da demanda global. Isso ocorre, pois cada fornecedor entrega um mix diferente de produtos, de modo que para cada CD ser capaz de atender a demanda completa de uma mesorregião, ele precisa possuir o portfólio completo de produtos.

Para permitir a comparação adequada entre diversos tipos os custos, esse modelo tratará todos os valores de forma mensal. Para as entregas dos fornecedores, que são realizadas semanalmente, a modelagem considerará M_i entregas por mês, sendo a quantidade total a ser entregue no período dividida igualmente entre elas.

5.2 Formulação matemática

A seguir serão descritas as principais restrições, associações, conjuntos, parâmetros e variáveis do modelo, antes de se apresentar a formulação matemática propriamente dita.

Principais restrições:

- Todos os pedidos dos clientes devem ser atendidos;
- A demanda de cada mesorregião será atendida por um único CD;
- Apenas centros de distribuição abertos podem atender a alguma demanda;
- A quantidade movimentada em cada centro de distribuição deve ser inferior sua a capacidade de expedição;
- Todos os centros de distribuição devem ser atendidos por todos os fornecedores, recebendo a quantidade proporcional ao percentual que o mix de produtos desse fornecedor representa da demanda total.
- Cada fornecedor realiza M_i entregas por mês, todas com a mesma quantidade.
- A soma da quantidade que cada centro de distribuição recebe de todos os fornecedores deve ser igual a soma da quantidade enviada para todos os clientes.

Associações:

- A cada fornecedor i está associado ao percentual (M_i) que seu mix de produtos representa da demanda total;
- A cada centro de distribuição j está associado a uma capacidade de expedição limite (L_j), que representa o valor máximo da demanda que o CD consegue atender por mês. Estão associados também um custo mensal de operação fixo (CF_j), que será contabilizado para aquele CD, caso ele seja aberto, e um custo variável unitário (CV_j) que será multiplicado pela quantidade movimentada naquele CD;
- A cada mesorregião k está associada à sua demanda mensal em número de pedidos e a uma quantidade entregue por pedido. Esses valores são diferentes entre clientes do modelo B2B (DB_k e QB_k , respectivamente), e B2C (DC_k e QC_k , respectivamente);

- A cada faixa f de pesos está associado a um limite de peso superior por entrega (S_f) para aquela faixa. O limite inferior de cada faixa é igual ao superior da faixa imediatamente anterior;
- A cada par centro de distribuição – mesorregião está associado a um custo de transporte por pedido para clientes no modelo B2B (CTB_{jk}) e outro para clientes no modelo B2C (CTC_{jk});
- A cada terno fornecedor – centro de distribuição – faixa de peso está associado a um custo de transporte por entrega (CT_{ij}^f).

Conjuntos

- I: Conjunto dos fornecedores (índice i);
- J: Conjunto dos centros de distribuição candidatos (índice j);
- K: Conjunto das mesorregiões atendidas (índice k);
- F: Conjunto de faixas de peso (índice f).

Parâmetros do modelo:

- M_i : Percentual da demanda total correspondente ao mix de produtos entregues pelo fornecedor i ;
- N_i : Número de entregas realizadas por mês pelo fornecedor i .
- CF_j : Custo fixo mensal de operação do centro de distribuição j , caso ele seja aberto;
- CV_j : Custo variável unitário de operação (R\$/kg movimentado) do centro de distribuição j ;
- L_j : Quantidade limite, em kg, que pode ser movimentada por mês a partir do centro de distribuição j ;
- DB_k : Demanda total mensal, em número de pedidos, dos clientes B2B da mesorregião k ;
- QB_k : Quantidade média, em kg por pedido realizado para clientes B2B da mesorregião k ;
- DC_k : Demanda total mensal, em número de pedidos, dos clientes B2C da mesorregião k ;
- QC_k : Quantidade média, em kg por pedido, realizado para clientes B2C da mesorregião k ;
- S_f : Limite superior da faixa de peso f em kg;

- CTB_{jk} : Custo de transporte por pedido entre o centro de distribuição j e a mesorregião k , considerando o perfil de demanda de clientes B2B;
- CTC_{jk} : Custo de transporte por pedido entre o centro de distribuição j e a mesorregião k , considerando o perfil de demanda de clientes B2C;
- CT_{ij}^f : Custo de transporte por entrega entre o fornecedor i e o centro de distribuição j para a faixa de peso f .

Variáveis de decisão:

- Y_j : Variáveis binárias que indicam se os centros de distribuição j serão abertos (1 se sim, 0 se não);
- U_{ij}^f : Variáveis binárias que indicam se a quantidade movimentada por pedido entre os fornecedores i e os centros de distribuição j estão nas faixas de peso f (1 se sim, 0 se não);
- X_{jk} : Variáveis binárias que indicam se a demanda das mesorregiões k serão atendidas pelos centros de distribuição j (1 se sim, 0 se não);
- ZB_{jk} : Variáveis de decisão que indicam o número de pedidos entregues dos CDs j para as mesorregiões k para atender clientes B2B;
- ZC_{jk} : Variáveis de decisão que indicam o número de pedidos entregues dos CDs j para as mesorregiões k para atender clientes B2C;
- W_{ij} : Variáveis de decisão que indicam a quantidade, em kg, transportada dos fornecedores i para os CDs j .

Função objetivo:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{j \in J} (CF_j Y_j) + \sum_{j \in J} (CV_j \sum_{i \in I} W_{ij}) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (N_i \sum_{f \in F} (CT_{ij}^f U_{ij}^f)) \\ & + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (CTB_{jk} ZB_{jk} + CTC_{jk} ZC_{jk}) \end{aligned} \quad (1)$$

Restrições:

$$\sum_{j \in J} X_{jk} = 1, \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$ZB_{jk} = DB_k X_{jk}, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$ZC_{jk} = DC_k X_{jk}, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$W_{ij} = M_i \sum_{k \in K} (ZB_{jk} QB_k + ZC_{jk} QC_k), \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} (ZB_{jk}QB_k + ZC_{jk}QC_k) \leq L_j Y_j, \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{f \in F} U_{ij}^f = Y_j \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$\frac{W_{ij}}{N_i} \leq \sum_{f \in F} (U_{ij}^f S_f) \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad (8)$$

$$Y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J \quad (9)$$

$$X_{jk} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K \quad (10)$$

$$U_{ij}^f \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall f \in F \quad (11)$$

5.3 Descrição do modelo

Função Objetivo (1):

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{j \in J} (CF_j Y_j) + \sum_{j \in J} (CV_j \sum_{i \in I} W_{ij}) + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (N_i \sum_{f \in F} (CT_{ij}^f U_{ij}^f)) \\ & + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (CTB_{jk} ZB_{jk} + CTC_{jk} ZC_{jk}) \end{aligned}$$

A função objetivo busca minimizar o custo logístico total da Cosméticos S.A., que é composto por quatro parcelas, custo fixo de operação do centro de distribuição, custo variável de operação do centro de distribuição, custo de transporte no trajeto fornecedor – CD e custo de transporte no trajeto CD - mesorregião.

A primeira parcela representa os custos de operação fixos dos centros de distribuição. Esse valor é obtido somando para todos os CDs o produto entre parâmetro CF_j (parcela fixa do custo de operação mensal do centro de distribuição j) e a variável de decisão Y_j (variável de decisão binária que assume valor 1 caso o CD j seja aberto e 0 em caso contrário). Desse modo consideram-se apenas o custo fixo dos CDs que forem abertos.

A segunda parcela representa os custos variáveis de operação dos centros de distribuição. Esse valor é obtido somando para todos os CDs o parâmetro CV_j (custo unitário, em R\$/kg, de operação do centro de distribuição j) pela quantidade mensal, em kg, movimentada naquele CD. Essa quantidade é calculada somando, para todos os fornecedores, a quantidade entregue por cada um deles.

A terceira parcela representa o custo de transporte dos fornecedores para o(s) centro(s) de distribuição. Esse valor é obtido somando-se, para todos os pares fornecedor – CD, o produto

das N_i entregas realizadas por mês pelo custo por entrega. O custo por entrega, por sua vez, é calculado como a somatória para todas as faixas de peso f , da multiplicação do parâmetro CT_{ij}^f (custo de transporte por pedido entre o fornecedor i e o centro de distribuição j considerando a faixa de peso f), pela variável de decisão binária U_{ij}^f (que assume valor 1 caso a quantidade movimentada por pedido entre o fornecedor i e o centro de distribuição j esteja na faixa de peso f , e 0 caso contrário). Desse modo, será considerado apenas o custo correspondente à faixa de peso que está sendo de fato movimentada em cada entrega.

A última parcela representa o custo de transporte entre os centros de distribuição e os clientes. Esse valor é obtido somando-se, para todos os pares CD – mesorregião, o produto entre a quantidade de pedidos entregue e o custo por pedido no trecho, considerando a distinção entre os clientes do modelo B2B (ZB_{jk} e CTB_{jk}) e B2C (ZC_{jk} e CTC_{jk});

Restrição (2): $\sum_{j \in J} X_{jk} = 1, \quad \forall k \in K$

Esse conjunto de restrições garante que todas as mesorregiões sejam atendidas por um e apenas um CD.

Restrição (3): $ZB_{jk} = DB_k X_{jk}, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K$

Esse conjunto de restrições garante que, para todos os pares CD – mesorregião, a quantidade de pedidos entregue para clientes no modelo B2B (ZB_{jk}) seja igual à demanda desse grupo de clientes (DB_k) caso a mesorregião seja atendida pelo CD k ($X_{jk} = 1$) e 0 em caso contrário ($X_{jk} = 0$). Desse modo, se garante que toda a demanda dos clientes no modelo B2B será atendida.

Restrição (4): $ZC_{jk} = DC_k X_{jk}, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K$

Esse conjunto de restrições garante que, para todos os pares CD – mesorregião, a quantidade de pedidos entregue para clientes no modelo B2C (ZC_{jk}) seja igual à demanda desse grupo de clientes (DC_k) caso a mesorregião seja atendida pelo CD k ($X_{jk} = 1$) e 0 em caso contrário ($X_{jk} = 0$). Desse modo, se garante que toda a demanda dos clientes no modelo B2C será atendida.

Restrição (5): $W_{ij} = M_i \sum_{k \in K} (ZB_{jk} QB_k + ZC_{jk} QC_k), \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J$

Esse conjunto de restrições garante que, para todo par $i - j$, a quantidade enviada por cada fornecedor i para o centro de distribuição j (W_{ij}) seja proporcional ao percentual (M_i) que o mix de produtos desse fornecedor representa da demanda total. Além disso, garante que

a quantidade que chega ao centro de distribuição j seja igual à quantidade que sai dele, uma vez que $\sum_{i \in I} M_i = 1$.

$$\textbf{Restrição (6): } \sum_{k \in K} (ZB_{jk} QB_{jk} + ZC_{jk} QC_{jk}) \leq L_j Y_j, \quad \forall j \in J$$

Esse conjunto de restrições garante que, para todos os centros de distribuição não abertos ($Y_j = 0$), a demanda atendida seja nula. Além disso, para os CDs abertos ($Y_j = 1$) garante que a demanda atendida, em kg, $(ZB_{jk} QB_{jk} + ZC_{jk} QC_{jk})$ seja menor ou igual a sua capacidade de expedição (L_j).

$$\textbf{Restrição (7): } \sum_{f \in F} U_{ij}^f = Y_j \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J$$

Esse conjunto de restrições garante que, para todos os pares fornecedor - centro de distribuição, a variável U_{ij}^f , assumirá valor 1 em uma e apenas uma faixa f , nos casos em que o CD j for aberto ($Y_j = 1$)

Já para um dado CD j que não for aberto ($Y_j = 0$) todas as variáveis U_{ij}^f serão nulas. Desse modo, não haverá nenhum custo de transporte entre os fornecedores e esse centro de distribuição.

$$\textbf{Restrição (8): } \frac{W_{ij}}{N_i} \leq \sum_{f \in F} (U_{ij}^f S_f) \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J$$

Esse conjunto de restrições classifica, para todos os pares fornecedor – CD, a quantidade a ser movimentada em cada entrega (W_{ij}/N_i , pois cada fornecedor i realiza N_i entregas iguais por mês) na faixa f correspondente, que será chamada de f' . Como, pela Restrição (7), para cada par $i - j$ U_{ij}^f será igual a 1 para um único valor de f , valores de $f < f'$ serão eliminados por não satisfazerem a desigualdade $W_{ij}/4 \leq S_f$.

Já valores de $f > f'$, não eliminados por essa restrição, também não serão selecionados pelo modelo, pois implicam custos maiores na terceira parcela da função objetivo $(\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (N_i \sum_{f \in F} (CT_{ij}^f U_{ij}^f)))$, já que o valor CT_{ij}^f aumenta com f . Sendo assim, o valor da variável de decisão U_{ij}^f assumirá o valor 1 apenas na faixa f' , para minimizar o custo na função objetivo.

Há dois casos, que merecem ser discutidos para esse conjunto de restrições:

- O primeiro deles é a situação em que $W_{ij}/N_i = 0$. Devido à Restrição (7), se o CD fosse aberto ($Y_j = 1$), seria necessário que algum valor de U_{ij}^f fosse igual a 1. Por sua vez, isso

implicaria a existência de um custo de transporte para esse trecho na terceira parcela da função objetivo ($CT_{ij}^f U_{ij}^f$), o que não faria sentido, já que não há nada a ser transportado. Porém essa situação não pode existir na modelagem proposta, pois uma das premissas consideradas foi que todos os centros de distribuição abertos recebem produtos de todos os fornecedores, o que é garantido pela Restrição (5).

- O segundo caso é aquele em que W_{ij}/N_i assume um valor muito alto. Se esse valor superasse o limite superior de todas as faixas f , essa restrição se tornaria infactível. Para contornar esse problema, o valor de S_f para a maior faixa f será grande o suficiente para que isso não aconteça.

Restrição (9): $Y_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J$

Esse conjunto de restrições garante que a variável de decisão Y_j seja binária para todos os centros de distribuição.

Restrição (10): $X_{jk} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \quad \forall k \in K$

Esse conjunto de restrições garante que a variável de decisão X_{jk} seja binária para todo o par centro de distribuição – mesorregião.

Restrição (11): $U_{ij}^f \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad \forall j \in J, \quad \forall f \in F$

Esse conjunto de restrições garante que a variável de decisão U_{ij}^f seja binária para todos os ternos de fornecedor, centro de distribuição e faixa de pesos.

6 RESOLUÇÃO DE UM CASO REDUZIDO

Para testar o modelo matemático desenvolvido, e garantir a consistência dos resultados obtidos através de uma análise de sensibilidade, foram realizados inicialmente testes com um conjunto reduzido de dados. Nesse capítulo serão apresentados os dados utilizados os testes realizados e os resultados obtidos.

O *software* utilizado para resolução do problema foi o IBM ILOG CPLEX versão 20.1, sendo os testes realizados em um computador de sistema operacional Windows 10, com processador Intel® Core™ i7-5500U CPU 2,40 GHz e com memória RAM instalada de 8,00 Gb. O modelo, em sua versão reduzida apresenta 102 variáveis e 34 restrições, sendo a solução obtida em menos de 5 segundos em todos os cenários considerados.

O código desenvolvido está disponível nos apêndices desse relatório.

6.1 Dados utilizados

Para gerar o conjunto reduzido de dados, buscou-se selecionar fornecedores, centros de distribuição e mesorregiões que fossem o mais representativo possível do universo completo de dados disponíveis. Cabe ressaltar que nesse capítulo serão apenas descritos os dados utilizados, enquanto a metodologia para obtê-los será explicada no Capítulo 7.

Dos 6 fornecedores da Cosméticos S.A. foram selecionados para esse caso reduzido os dois mais representativos que, por questões de confidencialidade serão chamados nesse trabalho de Fornecedor A e Fornecedor C. O mix de produção desses dois fornecedores em conjunto atende a 89,43% da demanda total da Cosméticos S.A..

Em função da modelagem proposta, é importante que a somatória dos parâmetros M_i (percentual que o fornecedor representa no mix da demanda total) seja igual 1. Desse modo, o percentual dos fornecedores A e C no problema reduzido (M_A' e M_C' , respectivamente) foi calculado mantendo a proporção existente entre eles no caso completo, como mostrado abaixo:

- $M_A' = M_A / (M_A + M_C) = 0,6447 / (0,6447 + 0,2496) = 72,09\%$
- $M_C' = M_C / (M_A + M_C) = 0,2496 / (0,6447 + 0,2496) = 27,91\%$

Já em relação aos centros de distribuição, foram selecionados dois entre os cinco candidatos considerados pela Cosméticos S.A.. O primeiro deles foi o CD atual, localizado no interior do Estado de São Paulo, e o segundo em Salvador, na Bahia (um dos estados considerados pela empresa para abertura de um novo CD). Os custos de operação fixo (CF_j) e

variável (CV_j), assim como a capacidade dinâmica de expedição (L_j) desses centros de distribuição podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Dados dos centros de distribuição considerados no exemplo com dimensões reduzidas

Centro de Distribuição	Custo de operação fixo (R\$/mês)	Custo de Operação Variável (R\$/kg)	Capacidade de expedição/mês
Lençóis Paulistas	420.909	1,48	501.600 kg
Salvador	311.192	1,10	501.600 kg

Fonte: Elaboração própria

Por fim, em relação às mesorregiões, foram escolhidas São Paulo, Campinas, Goiânia e Recife que representaram 38,9% das vendas (em peso) da Cosméticos S.A. em 2020. Elas foram selecionadas por serem responsáveis por uma parte significativa da demanda da empresa e estarem distribuídas pelo território nacional, garantindo que o problema não ficasse restrito ao estado de São Paulo. Os parâmetros utilizados no modelo para cada mesorregião, considerando a divisão em clientes B2B e B2C, está disponível na Tabela 2.

Tabela 2: Dados das mesorregiões consideradas no exemplo com dimensões reduzidas

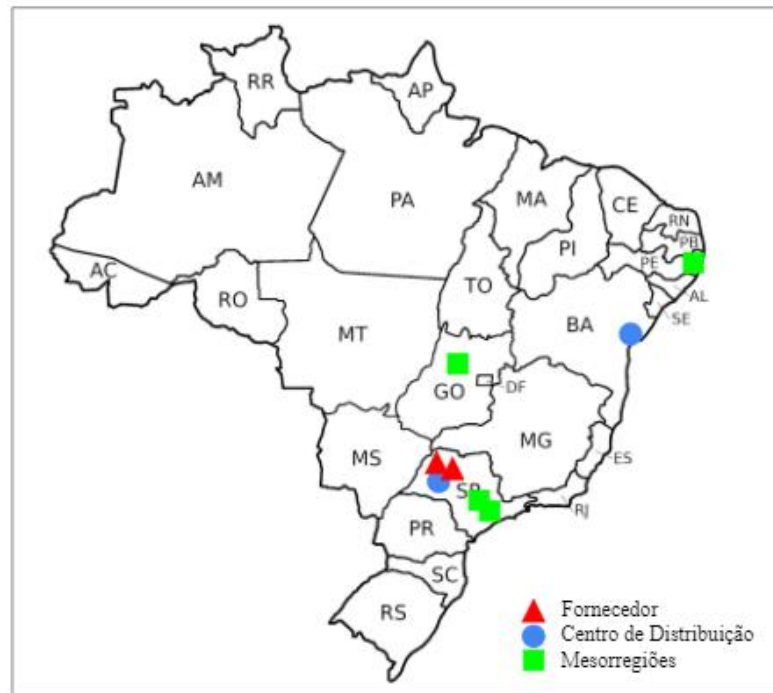
Mesorregião	Demanda B2B (pedidos/mês)	Peso médio por pedido B2B (kg)	Demanda B2C (pedidos/mês)	Peso médio por pedido B2C (kg)
São Paulo	5,09	3314	7836	3,16
Campinas	1,81	3314	1730	3,16
Goiânia	1,59	3577	348	4,51
Recife	1,07	1559	423	7,94

Fonte: Elaboração própria

De modo a facilitar a visualização do problema a ser resolvido no caso reduzido foi construída a Figura 5, que mostra um mapa com a distribuição geográfica, com posições aproximadas, de todos os fornecedores, centros de distribuição e mesorregiões consideradas.

Para cada par fornecedor - centro de distribuição, foram calculados os custos de transporte por faixa de peso, conforme será discutido na Seção 7.2. Os valores obtidos podem ser vistos na Tabela 3. O número de faixas de preço consideradas, assim como os valores limite de cada uma delas são os mesmos que serão utilizadas no caso completo.

Figura 5: Mapa ilustrativo do exemplo com dimensões reduzidas



Fonte: Elaboração própria

Tabela 3: Custo de transporte por faixa de peso (R\$/entrega) entre fornecedores e CDs

Fornecedor	A	A	C	C
CD	São Paulo	Bahia	São Paulo	Bahia
Faixa de peso (kg)				
0 - 2	18,42	27,43	14,28	27,43
2 - 4	32,93	59,90	18,95	59,90
4 - 6	47,43	92,36	23,62	92,36
6 - 8	61,86	124,83	28,29	124,83
8 - 10	76,29	157,30	32,96	157,30
10 - 20	119,59	254,70	46,96	254,70
20 - 30	195,47	425,15	71,46	425,15
30 - 50	303,06	666,99	106,13	666,99
50 - 70	444,59	985,06	151,75	985,06
70 - 100	618,95	1.376,87	207,98	1.376,87
100 - 150	886,52	1.978,20	294,22	1.978,20
150 - 200	1.210,89	2.707,14	398,82	2.707,14
200 - 300	1.520,51	3.402,93	498,64	3.402,93
300 - 1000	4.085,23	9.165,08	1.326,44	9.165,08
1000 - 2000	7.753,67	17.407,85	2.509,95	17.407,85
2000 - 3000	10.149,56	22.792,01	3.282,48	22.792,01
3000 - 4000	11.623,88	26.105,26	3.757,79	26.105,26
4000 - 1000000	13.282,06	29.832,26	4.292,07	29.832,26

Fonte: Elaboração própria

Por fim, o custo de transporte por entrega para todos os pares centro de distribuição – mesorregião, são apresentados na Tabela 4, para os clientes B2B e, na Tabela 5, para os clientes B2C. Cabe ressaltar que os custos por entrega no primeiro modelo são muito superiores aos do segundo, porém, a quantidade transportada por pedido também é muito maior, como mostra a Tabela 2.

Tabela 4: Custo de transporte (R\$/por entrega) entre CDs e mesorregiões para clientes B2B

CD \ Mesorregião	São Paulo	Bahia
São Paulo	10.092	22.662
Campinas	10.092	22.662
Goiânia	16.227	23.916
Recife	29.285	10.586

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5: Custo de transporte (R\$/por entrega) entre CDs e mesorregiões para clientes B2C

CD \ Mesorregião	São Paulo	Bahia
São Paulo	34,06	62,46
Campinas	34,06	62,46
Goiânia	60,94	84,46
Recife	254,09	98,97

Fonte: Elaboração própria

6.2 Resultados obtidos

Para o cenário base, o custo logístico total obtido foi de R\$ 1.169.242,00. Os valores obtidos para as variáveis podem ser vistos na Tabela 6, que, assim como as demais tabelas que serão apresentadas na seção, podem ser lidas da seguinte forma:

- Cada variável está associada a um ou mais grupos (fornecedores, centro de distribuição, mesorregiões e faixas de peso).
- Para o índice i , o valor 1 representa o Fornecedor A e o valor 2 representa o Fornecedor C.
- Para o índice j , o valor 1 representa o centros de distribuição de São Paulo e o valor 2 representa o CD da Bahia.
- Para o índice k , o valor 1 representa a mesorregião de São Paulo, o valor 2 representa Campinas, o 3 representa Goiânia e o 4 representa Recife.

- Para o índice f , as faixas de peso são numeradas de 1 a 18 em ordem crescente de limite superior.
- De modo a facilitar a visualização, apenas variáveis com valores diferentes de 0 serão mostradas.

Tabela 6: Resultados obtidos no cenário base para o caso com dimensões reduzidas

Variável	Resultado obtido
Y [CD]	$Y_1 = 1$
X [CD] [Mesorregião]	$X_{1,1} = 1; X_{1,2} = 1; X_{1,3} = 1; X_{1,4} = 1$
U [Fornecedor] [CD] [faixa de peso]	$U_{1,1,18} = 1; U_{2,1,18} = 1$
W [Fornecedor] [CD]	$W_{1,1} = 47132; W_{2,1} = 18247$
ZB[CD] [Mesorregião]	$ZB_{1,1} = 5,09; ZB_{1,2} = 1,81; ZB_{1,3} = 1,59;$ $ZB_{1,4} = 1,07$
ZC [CD] [Mesorregião]	$ZC_{1,1} = 7836; ZB_{1,2} = 1730; ZB_{1,3} = 348;$ $ZB_{1,4} = 423$

Fonte: Elaboração própria

Analisando-se o resultado obtido, pode-se perceber que o custo logístico é minimizado com a abertura apenas do centro de São Paulo, que atenderia a demanda de todas as mesorregiões. Esse resultado é coerente com o esperado, pois, apesar de seus custos de operação, tanto fixos quanto variáveis, serem superiores aos do CD da Bahia, ele está localizado muito mais próximo tanto dos fornecedores da Cosméticos S.A. quanto de duas das mesorregiões, sendo uma delas com maior volume de demanda.

Além disso, para atender a demanda de todas as mesorregiões, o centro de distribuição de São Paulo precisa receber uma quantidade de 65.379 kg somando ambos os seus fornecedores. Esse valor é bastante inferior à sua capacidade de expedição mensal (506.000 kg), o que ocorreu pois, apesar da demanda total ter sido reduzida ao selecionar apenas algumas mesorregiões a capacidade de expedição permaneceu inalterada em relação ao cenário completo.

Analisando-se as demais variáveis, percebe-se que a faixa de pesos foi alocada corretamente, pois ambos os fornecedores enviam no mês uma quantidade superior a 16.000 kg, o que implica um peso por entrega superior a 4000 kg, valor superior da penúltima faixa. Sendo assim, necessariamente a variável U_{ij}^f teria que assumir valor 1 na última faixa de pesos

para o centro de distribuição aberto. Já para os CD fechados, a variável assume o valor 0, de modo a zerar para esse trecho o custo de transporte na função objetivo, conforme desejado.

Os valores das variáveis ZB_k e ZC_k também são coerentes com o esperado, sendo iguais à demanda do respectivo tipo de cliente em cada mesorregião para o CD aberto e 0 para o centro de distribuição fechado.

6.3 Análise de sensibilidade

Após a resolução do caso base, foram testados alguns cenários, de modo a avaliar a sensibilidade dos parâmetros do modelo.

Primeiramente, a capacidade de expedição do centro de distribuição localizado no Estado de São Paulo foi reduzida para um valor de 60000 kg, inferior ao total da demanda das mesorregiões consideradas, de modo a forçar a abertura do CD da Bahia. O custo total resultante desse novo cenário (C1) foi de R\$ 1.496.236,79, e os valores das variáveis podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados obtidos no cenário C1 para o caso com dimensões reduzidas

Variável	Resultado obtido
Y [CD]	$Y_2 = 1$
X [CD] [Mesorregião]	$X_{2,1} = 1; X_{2,2} = 1; X_{2,3} = 1; X_{2,4} = 1$
U [Fornecedor] [CD] [faixa de peso]	$U_{1,2,18} = 1; U_{2,2,18} = 1$
W [Fornecedor] [CD]	$W_{1,2} = 47132; W_{2,2} = 18247$
ZB[CD] [Mesorregião]	$ZB_{2,1} = 5,09; ZB_{2,2} = 1,81; ZB_{2,3} = 1,59;$ $ZB_{2,4} = 1,07$
ZC [CD] [Mesorregião]	$ZC_{2,1} = 7836; ZB_{2,2} = 1730; ZB_{2,3} = 348;$ $ZB_{2,4} = 423$

Fonte: Elaboração própria

A solução obtida apresenta um custo superior ao cenário base, o que já era esperado, dado que a solução obtida no caso original, que era a melhor possível naquela situação foi inviabilizada.

Outro resultado importante é que para o cenário C1, foi tomada a decisão de abrir apenas o centro de distribuição da Bahia. Para as mesorregiões de Campinas e São Paulo, enviar produtos de fornecedores localizados no estado São Paulo até Salvador, para posteriormente enviá-los novamente para São Paulo não parece eficiente do ponto de vista do transporte. No

entanto, de acordo com o modelo, esse aumento no custo de transporte é inferior ao custo adicional de abertura de um segundo centro de distribuição. De fato, ao forçar a abertura dos dois centros de distribuição, reduzindo a capacidade de expedição mensal de ambos para 60.000 kg, o custo total obtido é superior (R\$ 1.536.244,23 no novo teste contra R\$ 1.496.236,79 no cenário C1).

Esses resultados demonstram que o custo fixo de operação dos centros de distribuição estão desproporcionais em relação aos custos de transportes. Assim como a capacidade, os custos fixos e variáveis de operação dos centros de distribuição não foram reduzidos, enquanto os custos de transporte totais diminuíram, pois estão ligados apenas ao atendimento da demanda das 4 mesorregiões selecionadas para esse caso reduzido.

Desse modo, se optou por analisar um novo cenário (C2) em que os custos fixos de operação dos centros de distribuição foram zerados, e a capacidade de expedição de cada centro voltou a ser 506.000 kg. O custo obtido (que não é comparável com o dos cenários anteriores, pois desconsidera o custo fixo de operação dos CDs, uma parte significativa dos gastos) foi de R\$ 734.119,89, e os valores das variáveis podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados obtidos no cenário C2 para o caso com dimensões reduzidas

Variável	Resultado obtido
Y [CD]	$Y_1 = 1; Y_2 = 1$
X [CD] [Mesorregião]	$X_{1,1} = 1; X_{1,2} = 1; X_{1,3} = 1; X_{2,4} = 1$
U [Fornecedor] [CD] [faixa de peso]	$U_{1,1,18} = 1; U_{1,2,14} = 1; U_{2,1,18} = 1; U_{2,2,14} = 1$
W [Fornecedor] [CD]	$W_{1,1} = 43508; W_{1,2} = 3624; W_{2,1} = 16844;$ $W_{2,2} = 1403$
ZB[CD] [Mesorregião]	$ZB_{1,1} = 5,09; ZB_{1,2} = 1,81; ZB_{1,3} = 1,59;$ $ZB_{2,4} = 1,07$
ZC [CD] [Mesorregião]	$ZC_{1,1} = 7836; ZB_{1,2} = 1730; ZB_{1,3} = 348;$ $ZB_{2,4} = 423$

Fonte: Elaboração própria

Com os custos fixos de operação dos centros de distribuição zerados, a decisão tomada foi de abrir ambos os CDs, sendo que o CD da Bahia atenderia a demanda de Recife, enquanto as demais mesorregiões seriam atendidas pelo CD de São Paulo.

Esse resultado é coerente com o que poderia se supor a partir de uma análise do mapa mostrado na Figura 5. O CD de São Paulo, é muito mais próximo de ambos os fornecedores do

que o CD da Bahia além de estar a uma distância menor das mesorregiões de São Paulo, Campinas e Goiânia. Como ambos os trechos são mais curtos utilizando o CD de São Paulo, decorre que, pela modelagem do problema, o custo de transporte será mais barato por esse caminho. Cabe ressaltar que, se a diferença entre os custos variáveis de operação dos CDs fosse grande o bastante, poderia ainda assim ser vantajoso utilizar o CD da Bahia para atender a essas mesorregiões, porém os resultados do modelo indicam que não é esse o caso.

Já para o caso de Recife, que as distâncias totais percorridas (trecho do fornecedor ao CD somado ao trajeto entre CD e cliente) utilizando o CD1 ou o CD2 são muito parecidas. Utilizando o CD de São Paulo a distância total é de 2991 km para o fornecedor A e 2883 para o C, contra 2766 km e 2820 km, respectivamente, se o CD da Bahia for utilizado.

Porém, como nos trechos entre fornecedores e centros de distribuição o peso movimentado por entrega é maior do que nos trajetos entre CDs e clientes, o custo por kg movimentado tende a ser menor, conforme discutido no Capítulo 3. Desse modo, se a distância total for igual, quanto maior o trecho percorrido na primeira parte do trajeto menor o custo total, de modo que o CD da Bahia se torna a melhor opção para atender a demanda de Recife.

Outro ponto interessante nos resultados obtidos para o cenário C2 é que a variável U_{ij}^f assume nessa situação valor 1 para faixas de peso diferentes da faixa máxima. Isso ocorreu, pois a quantidade movimentada dos fornecedores A e C para o centro de distribuição da Bahia foi inferior a 16000 kg, resultando em uma quantidade por entrega inferior a 4000 kg. Para o fornecedor A, a quantidade transportada por envio foi de 906 kg, enquanto para o fornecedor C esse valor foi de 351 kg. Ambos os valores estão na faixa 14, entre 300 kg e 1000 kg, precisamente aquela em que o modelo alocou.

Em suma, a execução dos testes acima descritos para o caso reduzido trouxe resultados coerentes tanto para o cenário base, quanto para a análise de sensibilidade realizada. Desse modo, o modelo foi considerado validado, e foi possível seguir para a execução do caso completo.

7 METODOLOGIA DE LEVANTAMENTO DE DADOS

Esse capítulo explica a metodologia utilizada para o levantamento e tratamento dos dados utilizados na realização deste trabalho. Essas informações foram coletadas pelo aluno em parceria com a equipe de consultores que atuou no projeto na Cosméticos S.A.

Devido a questões de confidencialidade, parte desses dados foram descaracterizados, para evitar que informações sigilosas da Cosméticos S.A. fossem divulgadas. No entanto, sempre que possível, a proporcionalidade entre os valores foi preservada, para que o problema a ser resolvido nesse trabalho guardasse relação com os desafios reais enfrentados pela empresa.

7.1 Coleta de dados

Para a resolução do problema com a modelagem proposta é necessário utilizar informações referentes ao processo de transporte das mercadorias, aos fornecedores da empresa, seus clientes, seu centro de distribuição atual e os locais candidatos a se tornarem futuros CDs.

7.1.1 Dados de custos de transporte

Em relação ao processo de transporte de mercadorias, a primeira informação levantada é de que a Cosméticos S.A., em linha com sua estratégia de focar no desenvolvimento de produtos, não possui frota própria, e assim, contrata terceiros para levar seus produtos até os clientes. Cada empresa contratada possui uma lógica de cobrança própria, porém foi entendido que a tabela desenvolvida pela Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística (NTC) seria uma boa aproximação para a realização de análises sobre os custos de transporte. Esses dados não estão disponíveis gratuitamente para o público (foram adquiridos pela consultoria contratada para o projeto), de modo que, por questões de confidencialidade, o aluno não pode receber seus dados, nem mesmo de forma descaracterizada.

Sendo assim, para fins deste trabalho, será utilizada uma versão que possui a mesma estrutura da tabela NTC, para facilitar a adaptação posterior do modelo a realidade da Cosméticos S.A.. Os dados, no entanto, serão estimados a partir de simulações realizadas com a calculadora de frete dos correios, disponível publicamente. A versão utilizada pode ser vista na Tabela 9.

A estrutura da tabela NTC, assim como a da versão que será utilizada nesse trabalho, traz o custo de transporte em função da distância a ser percorrida e do peso transportado. A análise dos dados levantados, mostra que, mantendo a distância constante, o custo por transporte

cresce conforme o peso aumenta, porém não na mesma proporção (um aumento de 100% no peso transportado tende a fazer o custo do frete crescer em uma razão menor do que 2). Analogamente, se o peso transportado for mantido constante, o custo por entrega cresce com o aumento da distância a ser percorrida, porém, em uma proporção menor que o incremento na distância.

Tabela 9: Tabela de custo de transporte por distância e peso transportado

Custo de Transporte (R\$/pedido)		Distância (km)				
		< 100	100 a 500	500 a 1000	1000 a 2000	> 2000
Peso Transportado (kg)	0 - 2	14,28	18,42	22,25	27,43	41,69
	2 - 4	18,95	32,93	44,28	59,90	102,66
	4 - 6	23,62	47,43	66,30	92,36	163,62
	6 - 8	28,29	61,86	88,33	124,83	224,62
	8 - 10	32,96	76,29	110,36	157,30	285,63
	10 - 20	46,96	119,59	176,44	254,70	468,64
	20 - 30	71,46	195,47	292,08	425,15	788,48
	30 - 50	106,13	303,06	456,12	666,99	1.242,67
	50 - 70	151,75	444,59	671,87	985,06	1.840,00
	70 - 100	207,98	618,95	937,66	1.376,87	2.575,79
	100 - 150	294,22	886,52	1.345,55	1.978,20	3.705,10
	150 - 200	398,82	1.210,89	1.840,02	2.707,14	5.074,00
	200 - 300	498,64	1.520,51	2.312,00	3.402,93	6.380,67
	300 - 1000	1.326,44	4.085,23	6.221,07	9.165,08	17.200,72
	1000 - 2000	2.509,95	7.753,67	11.812,77	17.407,85	32.679,46
	2000 - 3000	3.282,48	10.149,56	15.465,06	22.792,01	42.790,66
	3000 - 4000	3.757,79	11.623,88	17.712,55	26.105,26	49.012,85
4000 +	4.292,07	13.282,06	20.240,55	29.832,26	56.012,42	

Fonte: Elaboração própria

Para ilustrar como a tabela deve ser utilizada para análise do transporte, será realizado um exemplo, com base em um caso hipotético em que se deseje realizar uma entrega de 22 kg com origem na cidade de São Paulo e destino em Belo Horizonte (distância real, considerando a malha rodoviária disponível é de aproximadamente 600 km). Considerando a Tabela 9, o custo por pedido será de R\$ 292,08, já que o peso está na faixa de 20kg a 30kg e a distância está entre 500km e 1000km.

Cabe ressaltar que, devido à escala da Cosméticos S.A., a empresa tem pouco poder de barganha frente às transportadoras contratadas. Com base nas informações levantadas, caso sejam realizadas várias entregas para um mesmo cliente em um determinado mês, cada uma delas será cobrada individualmente. Além disso, caso dois clientes de uma mesma região

recebam entregas no mesmo dia, a cobrança também será de forma individualizada, considerando a distância e a quantidade de cada entrega. Desse modo, para esse trabalho se considerará que a cobrança é baseada na quantidade transportada a cada entrega e não no valor total movimentado em um determinado período ou para uma região específica.

Por fim, vale ressaltar que os valores superiores das faixas de peso que compõe as linhas da Tabela 9 serão utilizadas no modelo como o parâmetro S_f (limite superior de cada faixa de peso).

7.1.2 Dados dos fornecedores

Em relação aos fornecedores, foi obtida a localização da fábrica de todas as 6 empresas que fabricam os produtos desenvolvidos pela Cosméticos S.A., conforme pode ser visto na Tabela 10, na qual o nome dos fornecedores foi omitido por questões de confidencialidade. Cabe ressaltar que, todas as empresas se localizam no estado de São Paulo, próximas ao atual centro de distribuição da Cosméticos S.A..

Tabela 10: Dados levantados sobre os fornecedores.

Fornecedor	Latitude	Longitude	Representatividade	Frequência de entregas
A	-21,48	-49,23	64,47%	4 entregas/mês
B	-22,92	-48,47	3,20%	4 entregas/mês
C	-22,88	-48,45	24,96%	4 entregas/mês
D	-22,75	-50,59	6,70%	4 entregas/mês
E	-23,67	-46,70	0,01%	4 entregas/mês
F	-22,31	-49,05	0,66%	4 entregas/mês

Fonte: Elaboração própria com base em dados fornecidos pela empresa.

Nessa tabela tem-se ainda a participação de cada fornecedor na quantidade total fornecida, sendo esse valor calculado com base em dados históricos da Cosméticos S.A., referentes ao ano de 2020. O peso dos produtos foi utilizado como métrica para essa análise, pois, conforme discutido na Seção 7.1.1, essa é a variável que afeta o custo de transporte. A análise desses valores permite notar que os fornecedores A e C, são os mais representativos, pois juntos, são responsáveis por quase 90% dos produtos entregues. Também foi levantada a frequência de entrega de cada fornecedor.

Por fim, buscou-se entender qual era o mix de produtos entregues por cada fornecedor. Essa informação é de extrema relevância para a resolução do problema, pois, se um subconjunto dos fornecedores for capaz de fabricar todos os produtos do portfólio da Cosméticos S.A., seria

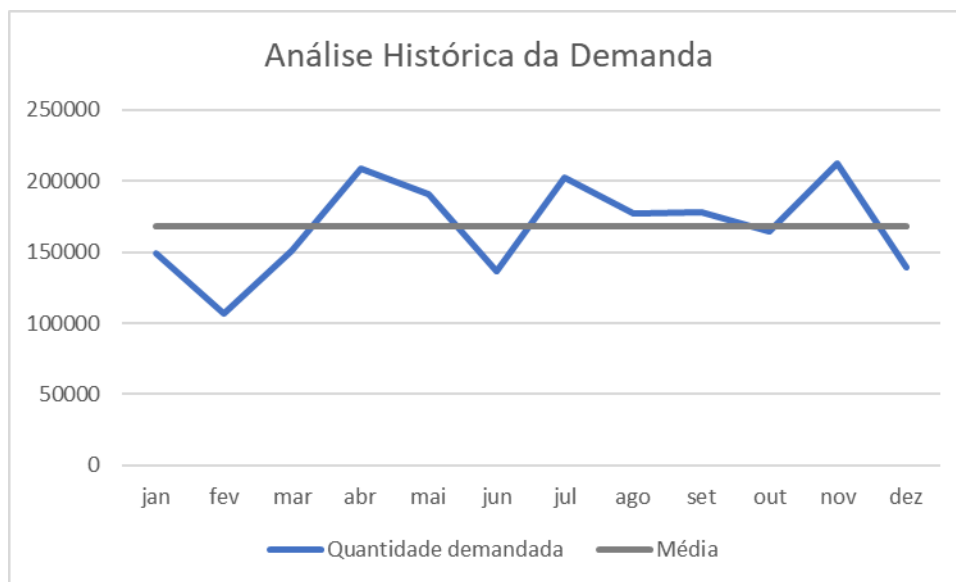
possível, ao menos em teoria, que um centro de distribuição fosse alimentado exclusivamente por esse subconjunto. No entanto, o que se notou é que cada fornecedor fabrica um mix diferentes de produtos. Desse modo, para obter todo o portfólio de itens, e assim atender a demanda completa é necessário receber entregas de todos os fornecedores, na proporção apresentada na Tabela 10.

7.1.3 Dados dos clientes

Em relação aos clientes da Cosméticos S.A., a empresa concedeu acesso à base de dados com o registro de todas as vendas realizadas no ano de 2020, que possuía informações de data da compra, localização do comprador, sua classificação em B2B ou B2C, além da quantidade, peso e modelo dos itens comprados.

A primeira análise realizada, foi buscar entender o comportamento histórico da demanda, mostrada na Figura 6. Percebe-se que, apesar de oscilar ao longo dos meses, a quantidade comprada pelos clientes da Cosméticos S.A. é relativamente estável, com um desvio padrão relativo de 18,7% e sem a presença de grandes picos ou vales. Desse modo, se considerou que o problema poderia ser resolvido considerando a demanda mensal média ao longo do ano sem grandes distorções causadas por sazonalidade.

Figura 6: Análise Histórica da Demanda



Fonte: Elaboração própria com base em dados fornecidos pela empresa.

Devido ao tamanho da base, para fins desse trabalho os dados foram agregados, de modo a ser obtida a quantidade média, em kg, demandada por mês para cada mesorregião, divisão regional do território brasileiro definida pelo IBGE. Os valores de demanda foram

multiplicados por um mesmo fator aleatório de modo a garantir o sigilo dos dados da Cosméticos S.A..

Ao fazer a agregação da demanda em mesorregiões, a informação de localização que estava disponível na base para cada cliente foi perdida, pois cada mesorregião abrange uma área ampla, não estando associada a um ponto específico. Desse modo, para a modelagem do problema, as coordenadas do município mais populoso de cada mesorregião (com base em dados do IBGE) foram adotadas como aproximação para a localização da mesorregião como um todo.

A agregação realizada manteve a divisão entre a demanda de clientes no modelo B2B e B2C. Essa separação é importante, pois os clientes que são empresas compram em média uma quantidade maior por pedido do que os clientes que são pessoas físicas e a quantidade transportada em cada entrega define o custo de transporte.

Também foi obtido o perfil de distribuição da quantidade demandada (percentual dos pedidos que se encontram em cada faixa de peso), com abertura por tipo de cliente e estado do país. Os valores para o modelo B2C são mostrados na Tabela 11.

A partir dessas informações, foram calculados a quantidade média demandada por pedido e a demanda em número de pedidos, respeitando a divisão em modelo B2B e B2C. Para explicar o racional desses cálculos, será descrito o passo a passo realizado, ilustrando cada etapa com o exemplo do estado do Ceará. A relação completa dos valores encontrados por mesorregião se encontra nos apêndices deste trabalho.

1. Calcular o peso médio por entrega, ponderando o valor de referência de cada faixa de peso (Tabela 11) pela frequência com que os pedidos se encontram nessa faixa de peso. O valor obtido será considerado para todas as mesorregiões do estado.
 - a. No caso do Ceará, se tem 7% dos pedidos na faixa 1 (entre 0 e 2 kg), cujo valor de referência é 1 kg, de modo que ao multiplicar esses valores se obtém 0,07. Ao realizar o mesmo procedimento para as demais faixas de peso e somar os resultados obtidos, se obtém um peso médio de 7,43 kg por pedido.

Tabela 11: Perfil de distribuição da quantidade demandada por pedido para clientes B2C

Peso Referência (kg)	1	3	5	7	9	15	25	40	
Faixa de Peso (kg)	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 50	
UF	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3	Faixa 4	Faixa 5	Faixa 6	Faixa 7	Faixa 8	Peso médio (kg/pedido)
AC	2%	10%	27%	23%	9%	18%	10%	0%	9,41
AL	3%	11%	28%	22%	11%	19%	5%	1%	8,73
AM	4%	12%	28%	19%	11%	19%	8%	0%	8,87
AP	3%	11%	25%	17%	11%	22%	11%	1%	10,12
BA	13%	23%	25%	17%	8%	11%	2%	0%	6,40
CE	7%	15%	30%	21%	9%	14%	4%	0%	7,43
DF	17%	44%	23%	9%	3%	4%	1%	0%	4,27
ES	17%	43%	23%	9%	3%	5%	0%	0%	4,35
GO	15%	43%	24%	9%	4%	4%	1%	0%	4,51
MA	4%	12%	30%	19%	11%	19%	4%	1%	8,38
MG	17%	42%	23%	9%	4%	5%	1%	0%	4,48
MS	16%	39%	23%	9%	5%	6%	3%	0%	5,06
MT	10%	37%	24%	11%	5%	9%	3%	0%	6,02
PA	6%	13%	26%	19%	10%	20%	7%	0%	8,74
PB	4%	13%	31%	20%	11%	16%	4%	0%	8,01
PE	6%	14%	28%	21%	10%	17%	5%	0%	7,94
PI	3%	13%	30%	22%	11%	17%	3%	0%	7,84
PR	19%	43%	22%	8%	4%	4%	1%	0%	4,35
RJ	18%	43%	23%	8%	4%	4%	1%	0%	4,28
RN	4%	16%	34%	22%	10%	12%	3%	0%	7,13
RO	3%	11%	28%	24%	12%	17%	6%	1%	8,63
RR	3%	8%	27%	22%	11%	20%	8%	1%	9,54
RS	17%	43%	22%	8%	3%	5%	2%	0%	4,61
SC	18%	43%	22%	8%	3%	4%	1%	0%	4,42
SE	3%	14%	34%	23%	11%	13%	2%	0%	7,28
SP	34%	44%	13%	5%	2%	2%	0%	0%	3,16
TO	8%	20%	28%	20%	10%	13%	2%	0%	6,89

Fonte: Elaboração própria com base em dados fornecidos pela empresa.

2. Calcular o número de pedidos por mês de cada mesorregião, dividindo-se a sua demanda em kg pelo peso médio calculado.
 - a. No caso da mesorregião de Fortaleza (CE), a demanda mensal dos clientes B2C era de 13696 kg. Ao dividir esse valor pelo peso médio de 7,43 kg por pedido, se obtém uma demanda mensal de 1844 pedidos.

As informações da Tabela 11 também foram utilizadas para o cálculo dos parâmetros de custos de transporte no trecho centro de distribuição – cliente. O racional por trás desses cálculos será detalhado na Seção 7.2.

7.1.4 Dados dos centros de distribuição

Sobre o centro de distribuição atual, situado no estado de São Paulo, foram obtidos a sua localização, seu custo de operação mensal e sua capacidade dinâmica de movimentação, ou seja, a quantidade em kg/mês que podem ser movimentada nesse CD.

Os custos de operação anualizados foram fornecidos pela Cosméticos S.A., considerando todos os gastos necessários para que o CD possa operar. Esses gastos foram agrupados em custos fixos (incluindo aluguel, água e energia) e variáveis (como mão de obra, operação e manutenção dos equipamentos). A partir dessas informações foram calculados os parâmetros do modelo:

- Custo de operação fixo mensal, dividindo o valor anualizado por 12;
- Custo de operação variável por kg expedido, dividindo o custo variável pelo total da demanda atendida pelo centro de distribuição.

Para os candidatos a se tornarem novos centros de distribuição foram adotadas premissas, juntamente a Cosméticos S.A., para estimar esse mesmo conjunto de dados. A empresa havia definido apenas uma lista de estados a serem avaliados (Minas Gerais, Bahia, Pernambuco e Espírito Santo), porém, para a modelagem proposta é necessário ter uma localização exata. Desse modo, foi adotada a premissa de que a capital de cada estado seria considerada como o local de instalação do CD.

Cabe ressaltar que, na realidade, é possível que esse centro venha a ser instalado em outro local (a depender da avaliação sobre o *trade off* discutido na Seção 3.2.4 entre proximidade com os clientes e custos de operação do CD). Na falta de um critério melhor, essa aproximação será utilizada para geração da base de dados para esse trabalho.

Para os custos fixos e variáveis de operação de cada centro de distribuição se tomou como base o gasto do CD atual. Porém, é importante notar que esses gastos variam de região para região, de modo que a aplicação de algum reajuste se faz necessária. Esses fatores foram estimados pela Cosméticos S.A. em parceria com a consultoria contratada, levando em consideração informações sobre custo de mão de obra e aluguel nas localidades analisadas.

A lógica aplicada acima parte da premissa de que a diferença de custo de operação entre os centros de distribuição é causada exclusivamente por diferenças entre as regiões. Por sua vez, isso implica que, os CDs tenham estrutura e quantidade de funcionários iguais ou similares, e, conseqüentemente, suas capacidades de expedição dinâmica seriam equivalentes. Os valores considerados nesse trabalho podem ser vistos na Tabela 12.

Tabela 12: Informações levantadas sobre os centros de distribuição

CD	Estado	Latitude	Longitude	Custo de Operação Fixo	Custo de Operação variável	Capacidade de expedição
1 (Atual)	São Paulo	-22,60	-48,81	224.955 R\$/mês	2,65 R\$/kg	501.600 kg/mês
2	Minas Gerais	-19.91	-43.93	160.814 R\$/mês	1,89 R\$/kg	501.600 kg/mês
3	Bahia	-12.97	-38.50	166.316 R\$/mês	1,96 R\$/kg	501.600 kg/mês
4	Espírito Santo	-20.32	-40.31	142.901 R\$/mês	1,68 R\$/kg	501.600 kg/mês
5	Pernambuco	-8.05	-34.88	161.939 R\$/mês	1,91 R\$/kg	501.600 kg/mês

Fonte: Elaboração própria com base em dados fornecidos pela Cosméticos S.A.

7.2 Cálculo dos parâmetros de custo de transporte

Ao longo da Seção 7.1, se explicou como foram obtidos os valores para todos os parâmetros considerados no modelo, com exceção dos custos de transporte. Devido a sua maior complexidade, se optou por reservar a Seção 7.2 justamente para explicar a lógica de cálculo desses valores.

Para isso, se explicará primeiramente como foram obtidas as distâncias entre todos os pares de regiões relevantes para o problema, que seguem o mesmo racional tanto para os trechos fornecedor – centro de distribuição quanto nos trajetos CD - cliente. Em seguida, será discutido separadamente como foi calculado o do custo de transporte em cada uma dessas etapas, pois as suas particularidades inviabilizam que eles sejam calculados da mesma forma. Todos os valores considerados no modelo serão disponibilizados nos apêndices desse relatório.

7.2.1 Cálculo das distâncias a serem percorridas

A distância percorrida foi calculada da seguinte forma:

1. Foram obtidas, conforme descrito na seção anterior, as coordenadas geográficas de cada fornecedor, centro de distribuição e mesorregião;
2. Foi calculada a distância entre cada par de pontos, utilizando a fórmula da distância geodésica: $Distância = 6371 * ACOS(COS\left(\frac{\pi}{2} - lat\ 1\right) * COS\left(\frac{\pi}{2} - lat\ 2\right) + SEN\left(\frac{\pi}{2} - lat\ 1\right) * SEN\left(\frac{\pi}{2} - lat\ 2\right) * COS(lon\ 2 - lon\ 1))$. Nessa fórmula, “lat 1” e “lon 1” correspondem, respectivamente, a latitude e longitude da origem, enquanto “lat 2” e “lon 2” representam, respectivamente, a latitude e longitude do destino;
3. Foi analisada a diferença entre a distância geodésica e a distância real, que existe devido ao fato de as estradas disponíveis nem sempre percorrem o trajeto mais direto entre os dois pontos. Para estimar o quão significativa é essa diferença foram analisados um conjunto de 10 pares de cidades, sendo que, para cada um deles, foi calculado tanto a distância geodésica quanto a distância através da malha rodoviária existente, usando o caminho mais rápido no aplicativo Google Maps. Os valores obtidos estão disponíveis na Tabela 13;

Tabela 13: Cálculo do fator de reajuste da distância

Cidade 1	Cidade 2	Distância geodésica (km)	Distância real (km)	Razão	Variação vs Média (%)
São Paulo	Belo Horizonte	491	592	1,21	-6.0%
Rio de Janeiro	Goiânia	939	1300	1,38	7.9%
Porto Alegre	Salvador	2304	3111	1,35	5.3%
Recife	São Paulo	2130	2640	1,24	-3.4%
Campinas	Florianópolis	542	767	1,41	10.2%
Cuiabá	Distrito Federal	875	1059	1,21	-5.6%
Fortaleza	Natal	437	525	1,20	-6.3%
Rio de Janeiro	São Paulo	2710	3386	1,25	-2.6%
Belém	Teresina	750	909	1,21	-5.5%
Goiânia	Vitória	1026	1395	1,36	5.9%
			Média	1,28	-

Fonte: Elaboração própria

4. Para cada par de cidades foi calculada a razão entre a distância real e a distância geodésica. As diferenças calculadas não apresentaram grande variação em relação à razão média obtida (1,28), sendo a maior diferença em termos percentuais de aproximadamente 10%;
5. A média obtida no Passo 4 foi aplicada como fator de reajuste sobre todas as distâncias calculadas no Passo 2, já que, com base na amostra analisada ela é uma boa aproximação para a distância real entre os pontos.

7.2.2 Custo de transporte por faixa de peso no trecho fornecedor - CD

Conforme discutido anteriormente neste trabalho, a quantidade enviada em cada entrega na etapa fornecedor centro de distribuição depende da quantidade total a ser enviada naquele mês, uma vez que a política de estoques da Cosméticos S.A. prevê entregas semanais de seus fornecedores. Desse modo, o modelo matemático descrito no Capítulo 5 não trabalha com um valor fixo de custo para cada par fornecedor – CD e sim, com um conjunto de valores, sendo cada um associado à uma faixa de pesos.

Para se obter esse conjunto são realizados os seguintes passos:

1. Calcular a distância entre cada par fornecedor – CD, conforme descrito na Seção 7.2.1;
2. Utilizando a tabela de custo de transporte, conforme descrito na Seção 7.1.1 encontrar os valores de custos de transporte por cada faixa de peso para a distância obtida no Passo 1.

7.2.3 Custo de transporte no trecho centro de distribuição - cliente

O cálculo do custo de transporte para o trajeto centro de distribuição – cliente tem diferenças significativas em relação ao que foi descrito para o trecho fornecedor - CD. A principal alteração vem do fato de que para essa etapa a quantidade a ser transportada em cada entrega não depende do total a ser movimentado no mês. Sendo assim, é possível usar como parâmetro de entrada do modelo um custo para cada par CD – Cliente.

Para se obter esse valor são realizados os seguintes passos:

1. Calcular o custo médio de transporte por entrega para cada faixa de distância, considerando o perfil de distribuição da quantidade demandada por pedido, abordado na Seção 7.1.3, para cada estado e tipo de cliente;

- a. Para uma dada faixa de distância determinar o custo de transporte por entrega para cada faixa de peso, conforme descrito na Seção 7.1.1;
 - b. Ponderar, para uma dada faixa de distância, o custo por frete para cada faixa peso pela sua frequência no perfil da demanda daquele estado para aquele tipo de cliente.
2. Calcular a distância entre cada par centro de distribuição – mesorregião, conforme descrito na Seção 7.2.1;
3. Determinar o custo de transporte por entrega a ser considerado no modelo (para cada par centro de distribuição – mesorregião), nos modelos B2B e B2C, associando a distância calculada no Passo 2 (para o estado em que a mesorregião em questão está localizada) ao custo por faixa de distância calculado no Passo 1.

8 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

Nesse capítulo será apresentado o processo de resolução do problema para o conjunto completo dos dados. A solução obtida será comparada com o modelo de malha logística atual da empresa, com o objetivo de mensurar o ganho que a implementação do modelo desenvolvido nesse trabalho pode trazer para a Cosméticos S.A..

A partir do cenário base serão realizadas diversas análises de cenários e sensibilidade no modelo, com a variação de alguns dos parâmetros utilizados. O objetivo é compreender como a solução proposta varia frente a mudanças na estrutura de custo da empresa e na demanda de seus clientes.

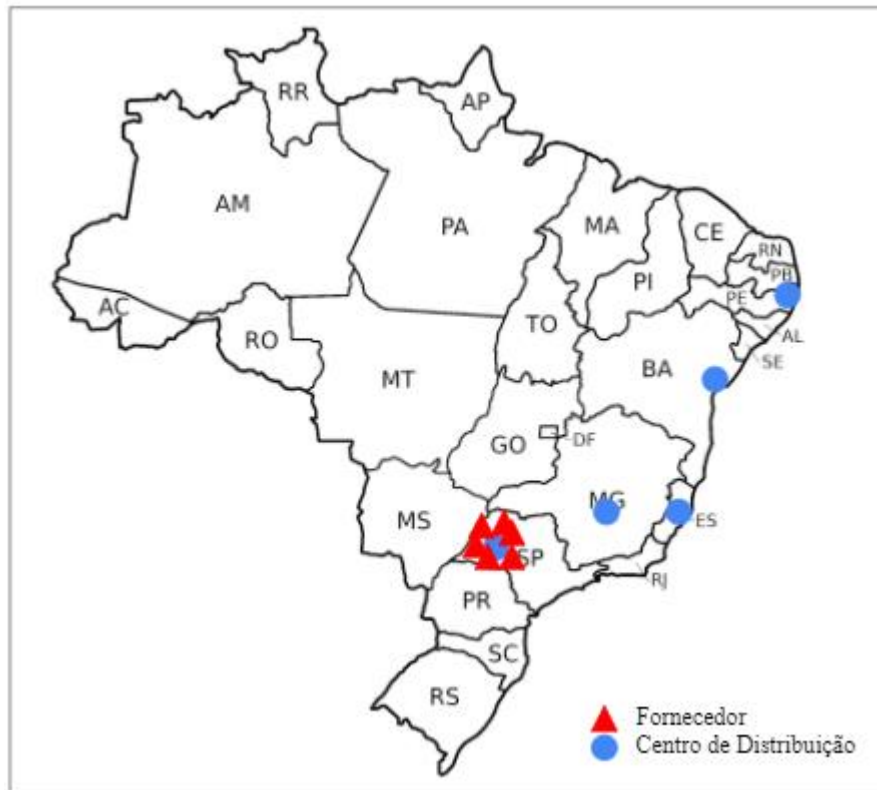
O *software* utilizado para resolução do problema foi o IBM ILOG CPLEX versão 20.1, sendo os testes realizados em um computador de sistema operacional Windows 10, com processador Intel® Core™ i7-5500U CPU 2,40 GHz e com memória RAM instalada de 8,00 Gb. Com o conjunto completo de dados, o modelo apresenta 2570 variáveis, sendo 1210 delas binárias, e 1558 restrições. O tempo de resolução do modelo não superou 30 segundos para nenhum dos cenários testados. O código desenvolvido está disponível nos apêndices desse relatório.

8.1 Solução obtida para o cenário base

Para a construção do cenário base foram utilizados os dados obtidos conforme explicado no Capítulo 7. Desse modo, temos cinco centros de distribuição candidatos localizados nos estados de São Paulo, Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais e Pernambuco, além de seis fornecedores, todos instalados próximos ao CD atual da empresa em São Paulo, como mostra a Figura 7. Com essa estrutura, a Cosméticos S.A. busca atender a demanda de seus clientes agrupados em 133 mesorregiões espalhados em todo o Brasil.

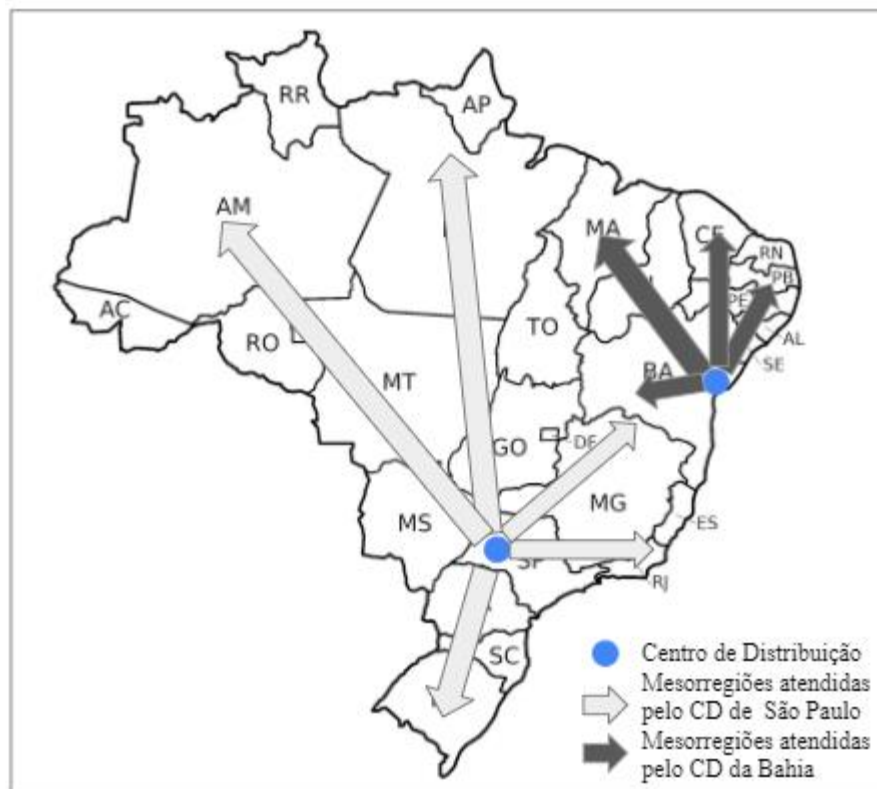
A solução obtida para o cenário base envolve a abertura dos centros de distribuição 1 (localizado no interior do estado São Paulo) e 3 (localizado na Bahia), resultando em um custo mensal de R\$ 2.861.288. O CD da Bahia atenderá a demanda de 43 mesorregiões, sendo a ampla maioria delas concentrada nos estados na Região Nordeste. Já o CD de São Paulo atenderá a demanda das outras 90 mesorregiões, distribuídas no restante do território brasileiro, conforme ilustrado pela Figura 8.

Figura 7: Mapa ilustrativo do problema completo



Fonte: Elaboração própria

Figura 8: Mapa ilustrativo da solução obtida para o cenário base



Fonte: Elaboração própria

Essa divisão é coerente com o esperado tendo em vista as informações levantadas no Capítulo 7. Para a maioria dos pontos localizados nas Regiões Sul, Sudeste, Centro Oeste e Norte, a distância total, considerando tanto o trecho fornecedor - centro de distribuição, quanto o trajeto CD – cliente, é significativamente menor utilizando o CD de São Paulo, como mostram os exemplos na Tabela 14 para o fornecedor A (o resultado observado para os demais fornecedores é semelhante).

Já para a Região Nordeste os valores de distância total percorrida são muito próximos comparando os dois centros de distribuição, como mostra a Tabela 14. No entanto, para o CD de São Paulo, um percentual maior dessa distância é percorrido no trajeto entre o centro de distribuição e o cliente, no qual a quantidade movimentada é menor, resultando em um custo por unidade movimentada mais elevado. Sendo assim, utilizar o CD da Bahia resulta em um custo de transporte total inferior para entregar para essas mesorregiões, ainda mais levando em consideração que esse CD apresenta um custo variável de operação menor.

Tabela 14: Distâncias totais percorridas para entrega entre o fornecedor A e cada mesorregião com base no CD utilizado

Mesorregião \ CD	São Paulo	Bahia
Rio de Janeiro (Sudeste)	909	3.453
Porto Alegre (Sul)	1.273	4.854
Manaus (Norte)	3.352	5.244
Goiânia (Centro Oeste)	1.016	3.474
Recife (Nordeste)	2.991	2.766

Fonte: Elaboração própria

A utilização de outros centros de distribuição poderia, pelos mesmos motivos, levar à redução dos custos de transporte. No entanto, como discutido na Seção 3.2.4 há um *trade off* a ser considerado, pois a abertura de novos CDs leva a um aumento do custo fixo de sua operação. O resultado no modelo mostra que para as demais localidades, o ganho obtido com a redução do gasto de transporte não compensa o aumento no custo fixo de operação dos CDs.

Para comparar a solução obtida no modelo com a situação atual da Cosméticos S.A. de forma adequada, não é possível utilizar informações reais da empresa, já que os dados utilizados nesse trabalho foram alterados. Sendo assim, foi calculado, utilizando o modelo matemático desenvolvido, o custo logístico total resultante da utilização exclusiva do centro de distribuição

atual da empresa. Para garantir que a solução gerada pelo modelo fosse essa, a capacidade de expedição dos demais candidatos a CD foi zerada.

O custo logístico total obtido nesse novo cenário foi de R\$ 2.887.334. Comparando com a solução proposta pelo modelo para o cenário base (R\$ 2.861.288), pode-se notar que a alteração da malha logística levaria a um custo ligeiramente inferior, propiciando uma economia de 0,9%. O fato dessa diferença ser tão pequena reforça a necessidade da realização de uma análise de sensibilidade, pois mesmo uma pequena variação nos parâmetros utilizados pode levar a uma alteração na configuração que leva a minimização dos custos logísticos da empresa.

8.2 Análise de sensibilidade para o cenário base

Para avaliar a solidez da solução proposta para o cenário base se optou inicialmente por alterar a proporção entre os custos de operação fixos e variáveis dos centros de distribuição. A opção por analisar a sensibilidade do modelo em relação a essa variável em específico se deu pela sua relevância para o problema (custos fixos elevados tornam menos vantajoso a abertura de novos centros de distribuição) e pelo grau de incerteza em relação ao seu valor real (na realidade os componentes do custo de operação não costumam ser completamente fixos ou variáveis e sim um misto entre eles).

No cenário base, os dados considerados refletiam a estimativa de que 66,43% dos custos se comportariam de forma variável, com os 33,57% restantes sendo considerados fixos. Para os cenários considerados essa divisão foi refeita da seguinte forma:

- No cenário C1, o valor total do custo de operação variável foi aumentado para 76,43% do total e o custo fixo foi reduzido para 23,57% do total;
- No cenário C2, o valor total do custo de operação fixo foi aumentado para 43,57% do total e o custo fixo foi reduzido para 56,43% total;

Em seguida, os parâmetros CV_j e CF_j sendo recalculados para ambos os casos, conforme descrito na Seção 7.1.4. Os valores utilizados são mostrados na Tabela 15.

Para o cenário C1 a solução proposta pelo modelo foi similar à obtida no cenário base, com a abertura de centros de distribuição em São Paulo e na Bahia, sendo que esse último atenderia principalmente a demanda da região Nordeste, enquanto o primeiro atenderia o restante do país. O custo total nesse cenário foi de R\$ 2.808.435, levando a uma economia de 2,7% em relação a situação atual, como mostra a Tabela 16.

Tabela 15: Parâmetros de custo fixo e variável considerados em cada cenário

Centro de Distribuição	Cenário Base		C1		C2	
	CF_j	CV_j	CF_j	CV_j	CF_j	CV_j
São Paulo	224.955	2,65	157.946	3,05	291.964	2,25
Minas Gerais	160.814	1,89	112.911	2,18	208.717	1,61
Bahia	166.316	1,96	116.775	2,25	215.858	1,66
Espírito Santo	142.901	1,68	100.334	1,94	185.468	1,43
Pernambuco	161.939	1,91	113.701	2,19	210.177	1,62

Fonte: Elaboração própria

Já no cenário C2, o maior custo fixo levou a solução proposta pelo modelo a envolver a abertura apenas do centro de distribuição de São Paulo. O custo logístico resultante foi de R\$ 2.887.334, o mesmo valor obtido para a situação atual, pois a redução do custo variável compensa o aumento do custo fixo. Análises posteriores foram realizadas para identificar o percentual considerado para os custos variáveis a partir do qual se torna vantajoso abrir um segundo centro de distribuição na Bahia. O valor encontrado foi de 61,52%

Tabela 16: Comparação entre os resultados obtidos nos cenários Base, C1 e C2 e a situação atual

Cenário	Base	C1	C2
Situação Atual	R\$ 2.887.334	R\$ 2.887.334	R\$ 2.887.334
Solução Modelo	R\$ 2.861.288	R\$ 2.808.435	R\$ 2.887.334
Variação (%)	-0,9%	-2,7%	N.A.

Fonte: Elaboração própria

Cabe ressaltar que para a situação atual, como há apenas um CD aberto e toda a quantidade movimentada passa por ele, essas mudanças não afetam o custo total de operação (apenas a sua divisão em fixo e variável), e consequentemente o custo logístico permanece inalterado.

Uma segunda simulação realizada foi a alteração dos valores por entrega considerados na tabela de transporte, aumentando-os em 10% (C3) e 25% (C4). Essa variação refletiria o contexto atual de aumento do preço do diesel, que afeta diretamente o custo de transporte, em especial em um país com o Brasil que é muito dependente do modal rodoviário. A proporção entre custos fixos e variáveis foi considerada a mesma do cenário base. Novamente as soluções trazidas pelo modelo foram comparadas à configuração adotada atualmente pela Cosméticos S.A.

Para o cenário C3, a solução gerada pelo modelo continuou sendo a abertura dos centros de distribuição de São e Paulo e Bahia. O custo logístico total obtido foi de R\$ 3.066.012, valor superior ao dos cenários base, C1 e C2, o que já era esperado, devido ao aumento do custo de transporte. Com essa nova configuração de custos, o cenário base apresentaria um custo de R\$ 3.109.059, conforme mostra a Tabela 17.

A solução gerada para o modelo C4 foi a mesma que para os cenários base e C3, com abertura dos centros de distribuição de São Paulo e Bahia, sendo que os custos logísticos totais também podem ser vistos na Tabela 17.

Tabela 17: Comparação entre os resultados obtidos na nos cenários Base, C3 e C4 e a configuração atual da empresa

Cenário	Base	C3	C4
Situação Atual	R\$ 2.887.334	R\$ 3.109.059	R\$ 3.441.645
Solução Modelo	R\$ 2.861.288	R\$ 3.066.012	R\$ 3.373.066
Variação (%)	-0,9%	-1,4%	-2,0%

Fonte: Elaboração própria

Analisando-se a diferença entre a solução proposta pelo modelo e a situação atual para os testes realizados pode-se perceber que o crescimento do custo de transporte aumenta o potencial de economia da solução proposta pelo modelo, tornando ainda mais vantajosa a alteração na malha logística da empresa. Isso ocorre pois, com o incremento nos custos de transporte, eles se tornam mais significativos em comparação aos custos fixos de operação dos CDs, favorecendo assim a abertura de novos centros de distribuição.

Por fim, as duas análises de sensibilidade realizadas acima (alteração na proporção entre custos fixos e variáveis dos centros de distribuição e aumento do custo de transporte) foram combinadas. O potencial de combinação em cada um dos 9 cenários testados é mostrado na Tabela 18. Com exceção dos casos marcados com N.A. (para os quais a solução trazida pelo modelo foi igual a situação atual), nos demais cenários considerados a configuração da malha logística definida envolvia a abertura dos CDs de São Paulo e Bahia.

Os resultados mostrados na Tabela 18 mostram que, com base nas premissas adotadas nesse trabalho, a implementação do modelo desenvolvido pode contribuir para redução do custo logístico da Cosméticos S.A.. No entanto, essa redução, frente a situação atual, não é muito significativa, chegando a apenas 3,5% no caso mais favorável. Esse fato demonstra que a configuração de malha logística adotada pela empresa atende adequadamente as suas necessidades atuais, sendo inclusive a melhor solução em dois dos cenários testados.

Tabela 18: Potencial de Economia por cenário testado

Potencial de Economia		% Custo Variável		
		- 10 p.p.	Base	+ 10 p.p.
Custo de Transporte	Base	N.A.	-0,9%	-2,7%
	+ 10%	N.A.	-1,4%	-3,1%
	+ 25%	-0,5%	-2,0%	-3,5%

Fonte: Elaboração própria

Dois fatores contribuem para que a configuração atual da Cosméticos S.A. esteja próxima da solução ótima calculada pelo modelo. O primeiro é a localização de seus fornecedores, que estão todos situados próximos ao centro de distribuição atual da empresa. Desse modo, o custo de transporte no trajeto fornecedor – CD, para o centro de distribuição de São Paulo é muito inferior ao dos demais.

O segundo fator é a demanda de seus clientes estar muito concentrada no estado de São Paulo, que representa 46,6% (em peso) das vendas totais da empresa. No entanto, a estratégia da companhia para os próximos anos é justamente fortalecer sua presença no resto do país, o que diminuiria o peso relativo do estado de São Paulo e tornaria mais importante a abertura de outros CDs.

Os argumentos acima mostram que um dos elementos que contribuem para que a configuração atual da empresa seja tão próxima da solução ótima podem perder relevância nos próximos anos. Sendo assim, é importante entender se, no futuro, o uso exclusivo do CD de São Paulo continuará resultando em uma solução que, mesmo não sendo a ótima, leve a um custo próximo do mínimo. Esse entendimento é importante para analisar se o esforço de alterar sua malha logística será compensado pelo retorno financeiro gerado. Essa discussão será realizada na próxima seção.

8.3 Análise do cenário futuro

Para modelagem da situação futura, os parâmetros considerados serão os mesmos apresentados no Capítulo 7 e utilizados no cenário base descrito na Seção 8.1. A exceção será a demanda por mesorregião, sobre a qual será acrescido um percentual α caso o estado seja São Paulo e 2α caso esteja no restante do país. Essa diferença se justifica, pois a Cosméticos S.A. já está mais bem estabelecida em SP, enquanto no restante do país possui um maior potencial de crescimento.

A Tabela 19 mostra o potencial de economia da solução oferecida pelo modelo em comparação a configuração atual em função dos valores de α . Os valores de α variam de 0, que equivale ao cenário atual, até 100%, valor limite que representa um cenário bastante otimista para os próximos 5 anos da Cosméticos S.A..

Tabela 19: Potencial de Economia por valor de α testado

α	Custo Situação Atual	Custo Solução Modelo	Variação	CDs abertos solução modelo
0,0%	2.887.334	2.861.288	-0,9%	Bahia e São Paulo
2,5%	2.995.812	2.953.016	-1,4%	
5,0%	3.110.187	3.040.273	-2,2%	
10,0%	3.330.455	3.227.147	-3,1%	
25,0%	3.981.380	3.746.069	-5,9%	
50,0%	5.075.883	4.666.967	-8,1%	
75,0%	6.160.721	5.518.509	-10,4%	
100,0%	7.247.402	6.341.527	-12,5%	Bahia, Minas Gerais e São Paulo

Fonte: Elaboração própria

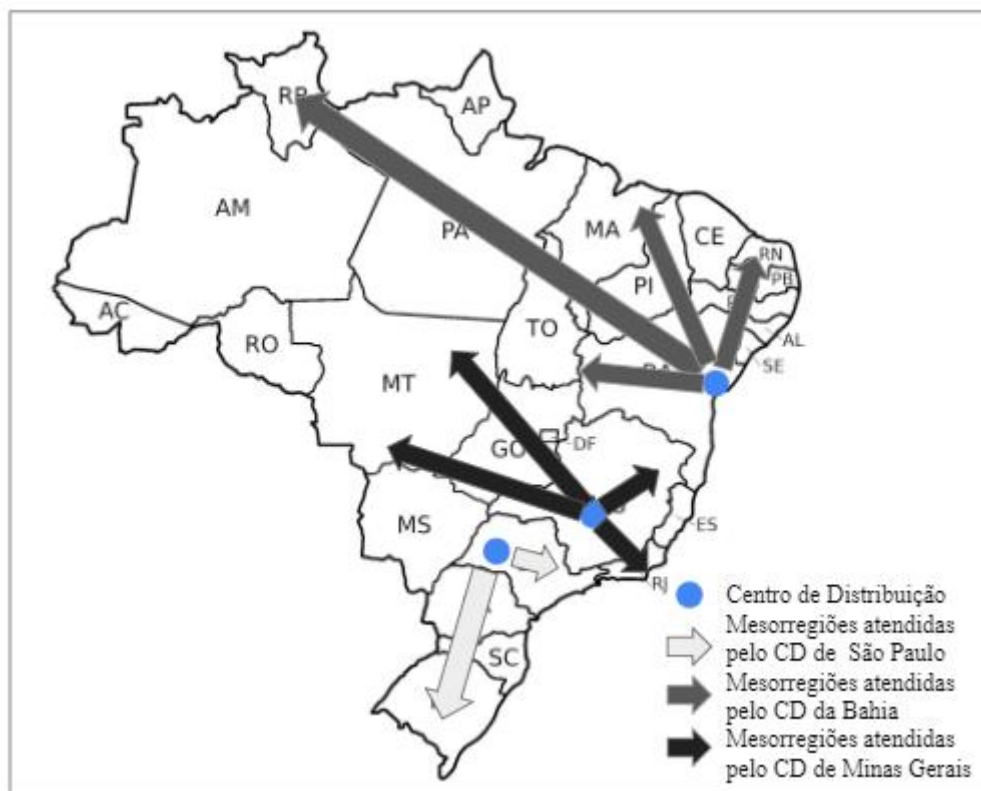
A análise dos resultados obtidos mostra que, conforme o esperado, o custo logístico total cresce com o aumento da demanda, que leva a uma maior quantidade a ser movimentada e, conseqüentemente a um maior custo de transporte. O mesmo ocorre com o potencial de economia tanto em termos absolutos quanto em percentual, o que é explicado por dois elementos:

- Em primeiro lugar, com o aumento da quantidade a ser movimentada se torna mais vantajoso abrir novos centros de distribuição, pois cresce a importância relativa de reduzir os custos de transporte frente ao gasto com custos fixos de operação;

- Um segundo elemento é a redução da importância relativa da demanda do estado de São Paulo frente ao restante do país, tornando mais importante a abertura de centros de distribuição em outros locais.

Esses motivos justificam também o fato de que, para o cenário com α igual a 100%, a configuração ótima previa a abertura de um terceiro centro de distribuição, em Minas Gerais. Com esse novo CD aberto, ele passa a atender, principalmente, a demanda da região Centro-Oeste e Sudeste, com exceção do estado de São Paulo, como ilustra a Figura 9. Para uma demanda grande o suficiente, a redução do custo de transporte obtida por se estar um pouco mais próximo dessas mesorregiões (em comparação aos outros CDs) se torna maior do que o seu custo fixo de operação. Esse valor limite de α é 87,20%.

Figura 9: Mapa ilustrativo da solução obtida para o cenário com α de 100%

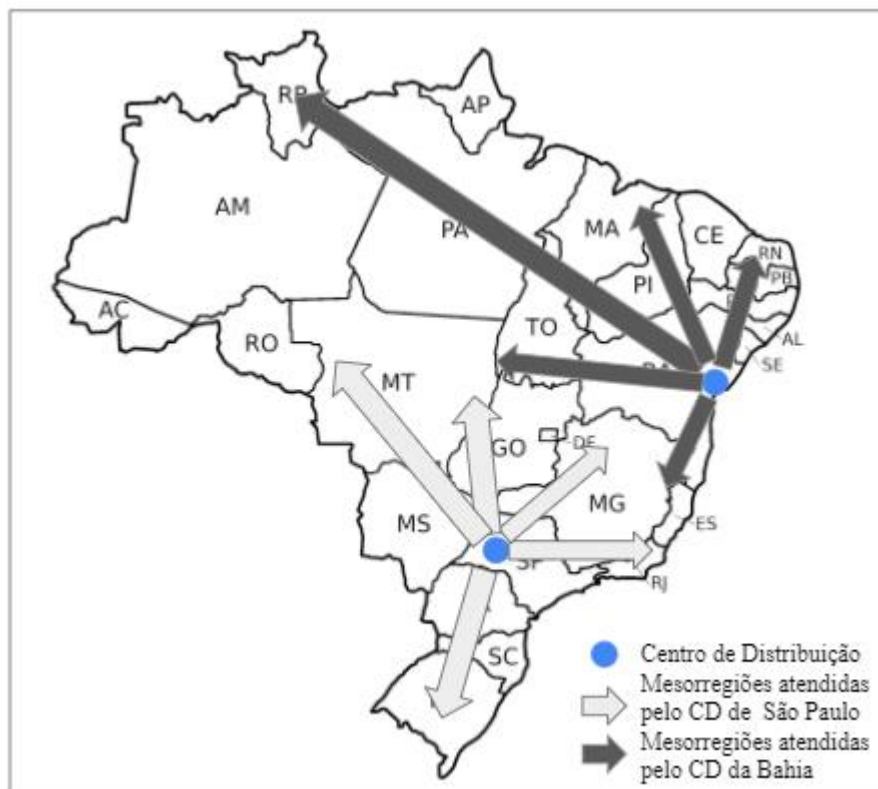


Fonte: Elaboração própria

Outro resultado interessante é que, com o aumento da demanda, a divisão entre quais mesorregiões seriam atendidas por cada centro de distribuição passou por modificações, mesmo em cenários em que os CDs abertos permaneceram os mesmos. Na situação base 90 das 133 mesorregiões eram atendidas pelo CD de São Paulo, sendo as 43 restantes atendidas pelo CD da Bahia. No entanto, para um α de 75% essa proporção se alterou, com 32 das mesorregiões antes atendidas pelo CD de São Paulo passando a ser atendidas pelo CD da Bahia, sendo que a

maioria das que mudaram estando localizadas na região Norte. A nova configuração é ilustrada pela Figura 10.

Figura 10: Mapa ilustrativo da solução obtida para o cenário com α de 75%



Fonte: Elaboração própria

Para entender a causa dessa mudança é necessário entender como cada um dos tipos de custos (custo fixo de operação do CD, custo variável de operação do CD, custo de transporte fornecedor – CD, custo de transporte CD - mesorregião) varia com a quantidade demandada. Para ilustrar essa análise, será utilizada como exemplo a mesorregião de Altamira (Pará), que no cenário base era atendida pelo centro de distribuição de São Paulo, e com α de 75% passou a ser atendida pelo CD da Bahia.

O custo fixo de operação não influencia na decisão de qual centro de distribuição atenderá a cada mesorregião, pois não varia com a quantidade movimentada.

O custo variável de operação cresce proporcionalmente com a quantidade movimentada. Como o CD da Bahia apresenta um custo de operação variável inferior ao de São Paulo, esse incremento da demanda aumenta o valor da economia (considerando apenas esse custo) de usar o CD da Bahia. No caso de Altamira, no cenário base a diferença no custo total variável de operação era de R\$ 107,95 e com um α de 75% passou a ser de R\$ 269,86.

O transporte no trajeto CD – mesorregião também aumenta proporcionalmente ao crescimento da demanda, pois esse crescimento se reflete diretamente na quantidade de pedidos a serem entregues. Para o caso específico de Altamira, os custos são iguais a partir de ambos os CDs, pois as distâncias se encontram na mesma faixa da tabela de custo de transporte. Para as mesorregiões em que há uma diferença de custo, o aumento da quantidade movimentada favorece aquelas com menor custo de transporte nesse trajeto.

Se os três fatores acima (custo fixo de operação do CD, custo variável de operação do CD e custo de transporte no trecho CD – mesorregião) fossem os únicos a ser considerados, não faria sentido que um aumento da demanda levasse a uma alteração no centro de distribuição que atende à cada mesorregião, pois os custos ou não influenciam na decisão ou variam de forma proporcional a quantidade movimentada.

No entanto, o custo de transporte no trecho fornecedor - CD também tende a crescer com o aumento da quantidade demandada, porém não na mesma proporção que o incremento da demanda. Isso ocorre, pois o aumento de preço ocorrerá apenas se o valor por entrega passar de uma faixa de peso para outra.

No caso específico de Altamira, no cenário base, a mesorregião é atendida pelo CD de São Paulo. Caso a mesorregião fosse atendida pelo CD da Bahia isso não alteraria a faixa de peso em que se encontra a quantidade a ser transportada de cada fornecedor para o CD de São Paulo, deixando esses custos inalterados. Porém, a quantidade movimentada por entrega entre o fornecedor 3 e o CD da Bahia ultrapassaria o limite superior da faixa 15 (2000kg), caso tivesse que atender a demanda de Altamira, o que levaria a um aumento de custo de R\$21.536,64/mês. Desse modo, no cenário base, não é vantajoso atender essa mesorregião a partir do CD da Bahia, pois o aumento do custo de transporte no trajeto fornecedor – CD é muito maior que a economia no custo variável de operação do centro de distribuição.

Já para o cenário com α de 75%, independente de qual centro de distribuição atenda a demanda de Altamira, o custo de transporte de cada fornecedor para cada CD permaneceria inalterado, já que a quantidade movimentada não ultrapassaria o valor limite das faixas de peso em que eles se situam. Sendo assim, temos que, para o cenário base a solução ótima envolve minimizar os demais custos, que são menores quando é utilizado o centro de distribuição da Bahia.

Analisando-se os dois cenários em conjunto, percebe-se que a diferença de alocação das mesorregiões aos centros de distribuição decorre, fundamentalmente, do modo como o custo de

transporte entre fornecedor e CD é calculado. O fato desse custo variar com a faixa do peso transportado por entrega faz com que em certos casos o custo marginal de atender mais uma região seja zero (cenário com α de 75%), e em outros seja muito alto (cenário base).

8.4 Recomendações para a empresa

Os resultados mostrados nas seções anteriores deste capítulo, mostram que a implementação do modelo computacional desenvolvido pode contribuir para redução do custo logístico da Cosméticos S.A. No momento atual a economia gerada pela solução proposta pelo modelo, em comparação com a configuração adotada pela empresa, não é muito significativa. No entanto, essa economia cresce com o aumento da demanda, e, como a empresa projeta um crescimento expressivo em seu futuro, o ganho potencial tende a aumentar.

As recomendações realizadas a seguir adotarão a premissa de que os resultados gerados com os dados reais sejam similares aos apresentados nesse trabalho. No entanto, é fundamental que qualquer decisão a ser tomada sobre a malha logística da empresa, leve em consideração os resultados obtidos no modelo para os dados reais.

Levando em conta as ressalvas acima, a recomendação do aluno (com base nos resultados obtidos nesse trabalho) é de que a empresa comece a analisar a abertura de um novo CD na Bahia, já no curto prazo. Essa ação levaria a uma redução (pequena, é verdade) nos custos, considerando o cenário atual. Contribuiria, também, para a Cosméticos S.A. reduzir o tempo de entrega nos estados da região nordeste, por diminuir a distância entre o CD e o cliente. Por fim, já prepara a malha logística da empresa para uma situação futura, em que a economia gerada por essa nova configuração passará a ser mais significativa com o crescimento da demanda.

Para determinar a localização exata em que o centro de distribuição deve ser instalado dentro do estado da Bahia, se recomenda a realização de outras análises para além do modelo. É importante considerar o *trade off* comentado no Capítulo 3, entre proximidade com os clientes e maiores custos de operação do CD. Além disso, se sugere que sejam avaliados municípios que ofereçam benefícios fiscais para a instalação de centros de distribuição.

Já a abertura do centro de distribuição de Minas Gerais não é recomendada nesse momento, tendo em vista que essa solução só passaria a ser ótima, de acordo com os resultados obtidos, para aumentos da demanda superiores a 87,20%, cenário que não é realista no futuro próximo da empresa. No entanto, dentro de alguns anos essa possibilidade pode ser reavaliada.

Diferentemente da decisão sobre abertura de novos centros de distribuição, a alocação da demanda das mesorregiões aos centros de distribuição pode ser alterada sem grandes impactos sobre a operação logística da empresa. Desse modo, é recomendado que a empresa reveja essa divisão periodicamente, pois, conforme visto na Seção 8.3 para o caso de Altamira, mudanças na demanda total podem alterar o CD que atenderá a determinada mesorregião.

Cabe ressaltar que essa decisão não pode ser tomada de forma independente para cada mesorregião, mesmo com a decisão prévia de quais centros de distribuição serão abertos. Fatores que levam em consideração a demanda de múltiplas mesorregiões (como a capacidade limite de movimentação de cada CD) fazem com que a alocação de todas precise ser analisada em conjunto. O custo de transporte no trecho fornecedor – CD também é um desses fatores, pois seu valor é calculado com base na faixa de peso movimentada que, por sua vez, depende da demanda de todas as mesorregiões atendidas por aquele CD.

O modelo matemático desenvolvido nesse trabalho pode ser utilizado para operacionalizar a decisão de alocação da demanda dos clientes aos centros de distribuição, garantindo que a análise leve em consideração todas as mesorregiões simultaneamente. De modo a utilizar somente os CDs abertos, basta zerar a capacidade de expedição dos demais.

O modelo também pode ser utilizado como suporte a tomada de decisão para a análise do custo logístico em novos cenários. Alguns exemplos de possíveis aplicações seriam:

- Revisão da política de estoques da empresa, que passaria a receber entregas mais ou menos frequentes de seus fornecedores;
- Criação de uma rede de fornecedores próxima ao novo centro de distribuição aberto;
- Oferecimento de descontos para compras em maiores quantidades, o que reduz o custo unitário de transporte.

É importante salientar, que a aplicação do modelo deve estar inserida no contexto mais amplo da Cosméticos S.A. Por um lado, decisões como as exemplificadas acima tem impactos sobre outras áreas da empresa e o custo logístico é apenas uma das variáveis a serem consideradas.

Por outro lado, o modelo deve ser alimentado por informações geradas em diversos processos da empresa, como a previsão da demanda por mesorregião para os próximos meses e o custo de transporte por entrega acordado com os terceiros contratados. Sendo assim, é

crucial que esses processos gerem informações confiáveis, pois a qualidade da solução proposta pelo modelo depende da qualidade dos dados utilizados.

9 CONCLUSÃO

Esse trabalho de formatura visou desenvolver uma abordagem estruturada para revisão a malha logística de uma empresa do setor de cosméticos. Para isso, o aluno recorreu a ferramentas de Pesquisa Operacional para construção de um modelo matemático capaz de otimizar o custo logístico através da decisão de localização de centros de distribuição (dado um conjunto de candidatos) e alocação da demanda dos clientes a esses CDs.

As diversas particularidades da operação logística da Cosméticos S.A., expostas ao longo deste trabalho, levaram a necessidade de adaptar os modelos já existentes na literatura para esse contexto. Em especial, o custo de transporte escalonado em função do peso transportado foi um elemento que levou a necessidade de algumas inovações, não tendo ainda sido abordado de forma exaustiva na literatura analisada.

Os resultados obtidos nesse trabalho mostram que a aplicação do modelo desenvolvido tem o potencial de reduzir os custos logísticos da Cosméticos S.A.. Essa economia pode ser pouco relevante para a situação atual, porém, com o crescimento da demanda projetado pela empresa para os próximos anos, esses valores devem se tornar mais significativos.

Cabe ressaltar que os parâmetros utilizados na modelagem foram gerados com base em diversas premissas, explicitadas no Capítulo 7, além de terem sido manipulados antes de serem enviados ao aluno para garantir a confidencialidade das informações da empresa. Desse modo, é possível que a aplicação do modelo com base em dados reais pode gerar resultados diferentes dos discutidos nesse trabalho.

Apesar dessas ressalvas, a incorporação do modelo matemático aos processos da empresa é recomendada, ao menos para avaliação do potencial de economia obtido considerando os dados reais. Para facilitar o uso do modelo no dia a dia da Cosméticos S.A. um próximo passo desse trabalho seria a construção de uma interface mais amigável para o usuário, além do treinamento dos funcionários da empresa para o uso, manutenção e aperfeiçoamento da ferramenta.

Por fim, a realização desse trabalho contribuiu significativamente para a formação do aluno, permitindo que ele entrasse em contato em maior profundidade com a metodologia de pesquisa científica, em especial no que se refere a revisão da bibliografia existente e ao levantamento de dados. Além disso, propiciou a ele aplicar os conhecimentos teóricos adquiridos ao longo da graduação na Escola Politécnica à solução um caso concreto do mundo empresarial. Os bons resultados obtidos nesse trabalho evidenciam a importância e o benefício

em potencial da aplicação do conhecimento gerado nas universidades aos desafios da realidade brasileira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANESSE, H. **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- BASSI, S. **Pesquisa operacional aplicada à área de logística de transportes rodoviários em projetos de grande porte**. *Trabalho de Formatura*, 2009.
- CORREIOS – Simulação de Preço do Malote. Disponível em: https://www2.correios.com.br/encomendas/malote/simular_preco.cfm. Acesso em 18 out. 2021.
- FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Divisão do Brasil em mesorregiões e microrregiões geográficas**. Rio de Janeiro, 1990.
- GHIANI, G.; LAPORTE, G.; MUSMANNO, R. **Introduction to Logistics Systems Planning and Control**. West Sussex: John Wiley & Sons, 2004
- IBGE – Portal das Cidades. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em 25 set. 2021.
- KLOSE, A.; DREXL, A. **Facility location models for distribution system design**. *European Journal of Operational Research*, v. 162, n. 1, p. 4-29, 2005
- ILOS – Especialistas em Logística e Supply Chain. **Custos logísticos no Brasil**. 2017
- LIEB, R. C.; BENTZ, B. A. **The use of third-party logistics services by large american manufacturers: the 2004 survey**. *Transportation journal*, INFORMS, p 5-15, 2005.
- LIEB, R. C.; LIEB, K. J. **The north american third-party logistic industry in 2013: The provider ceo perspective**. *Transportation journal*, INFORMS, v. 54, n. 1, p 104 – 121, 2015.
- MANGUINO, J.L.V. **Métodos heurísticos aplicados ao problema de roteamento de veículos com frota mista, janelas de tempo e custos escalonados por faixa de distância**. *Tese de Doutorado*, 2020.
- MANGUINO, J. L. V., RONCONI, D. P. **Step cost functions in a fleet size and mix vehicle routing problem with time windows**. *Annals of Operational Research*, 2021. doi: 10.1007/s10479-020-03915-y.
- MARASCO, A. **Third-party logistics: A literature review**. *International Journal of production economics*, Elsevier, v. 113, n. 1, p. 127-147, 2008.

REVELLE, C. S.; EISELT, H. A. **Location analysis:** A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research*, v. 165, n. 1, p. 1-19, 2005.

WINSTON, W. L. **Operations research – applications and algorithms.** Thomson, 2004

YOSHIZAKI, H. T. Y. **Projeto de redes de distribuição física considerando a importância do imposto de circulação de mercadorias e serviços.** *Tese de Livre Docência*, 2002.

APÊNDICE A – MODELAGEM DO PROBLEMA EM CPLEX OPL

/******

* OPL 20.1.0.0 Model

* Author: Ricardo Borsari Brinati

* Creation Date: 23 de out de 2021 at 14:07:18

*****/

//Conjuntos

int Nfornecedores = ...; // número de fornecedores considerados

range Fornecedores = 1..Nfornecedores;

int NcentrosDistribuicao = ...; //número de centros de distribuição candidatos

range CentrosDistribuicao = 1..NcentrosDistribuicao;

int Nmesorregioes = ...; //número de mesorregiões atendidas

range Mesorregioes = 1..Nmesorregioes;

int Nfaixas = ...; //número de faixas de peso consideradas

range faixas = 1..Nfaixas;

//Parâmetros

float M[Fornecedores] = ...; //Percentual da demanda total atendido pelo fornecedor i;

float N[Fornecedores] = ...; //Número de entregas por mês realizadas pelo fornecedor i;

float CF[CentrosDistribuicao] = ...; //Custo fixo mensal de operação do centro de distribuição j, caso ele seja aberto;

float CV[CentrosDistribuicao] = ...; //Custo variável unitário de operação (R\$/kg movimentado) do centro de distribuição j;

float L[CentrosDistribuicao] = ...; //Quantidade limite, em kg, que pode ser movimentada por mês a partir do centro de distribuição j;

float DB[Mesorregioes]= ...; //Demanda total mensal, em número de pedidos, dos clientes B2B da mesorregião k;

float QB[Mesorregioes] = ...; //Quantidade média, em kg por pedido realizado para clientes B2B da mesorregião k;

float DC[Mesorregioes]= ...; //Demanda total mensal, em número de pedidos, dos clientes B2C da mesorregião k;

float QC[Mesorregioes] = ...; //Quantidade média, em kg por pedido, realizado para clientes B2C da mesorregião k;

float S[faixas] = ...; //Limite superior da faixa de peso f em kg;

float CT[Fornecedores][CentrosDistribuicao][faixas] = ...; // Custo de transporte por entrega entre o fornecedor i e o centro de distribuição j para a faixa de peso f;

float CTB[CentrosDistribuicao][Mesorregioes] = ... ; //Custo de transporte por pedido entre o centro de distribuição j e a mesorregião k, considerando o perfil de demanda de clientes B2B;

float CTC[CentrosDistribuicao][Mesorregioes] = ...; //Custo de transporte por pedido entre o centro de distribuição j e a mesorregião k, considerando o perfil de demanda de clientes B2C.

//Variáveis

dvar boolean Y [CentrosDistribuicao]; //Variáveis binárias que indicam se os centros de distribuição j serão abertos (1 se sim, 0 se não);

dvar boolean X [CentrosDistribuicao][Mesorregioes]; //Variáveis binárias que indicam se a quantidade movimentada por pedido entre os fornecedores i e os centros de distribuição j estão nas faixas de peso f (1 se sim, 0 se não);

dvar boolean U [Fornecedores][CentrosDistribuicao][faixas]; //Variáveis binárias que indicam se a demanda das mesorregiões k serão atendidas pelos centros de distribuição j (1 se sim, 0 se não);

dvar float+ ZB[CentrosDistribuicao][Mesorregioes]; //Variáveis de decisão que indicam o número de pedidos entregues dos CDs j para as mesorregiões k para atender clientes B2B;

dvar float+ ZC[CentrosDistribuicao][Mesorregioes]; //Variáveis de decisão que indicam o número de pedidos entregues dos CDs j para as mesorregiões k para atender clientes B2C;

dvar float+ W[Fornecedores][CentrosDistribuicao]; //Variáveis de decisão que indicam a quantidade, em kg, transportada dos fornecedores i para os CDs j.

//Função Objetivo

minimize (sum (j in CentrosDistribuicao) Y[j]*CF[j] + //Custo fixo de operação mensal dos centros de distribuição

sum(j in CentrosDistribuicao) CV[j] * sum (i in Fornecedores) W[i][j] + //Custo variável de operação mensal dos centros de distribuição

sum(i in Fornecedores, j in CentrosDistribuicao) N[i] * sum (f in faixas) CT[i][j][f]*U[i][j][f] + //Custo mensal de transporte dos fornecidos i para os centros de distribuição j

sum(j in CentrosDistribuicao, k in Mesorregioes) CTB[j][k]*ZB[j][k] + //Custo mensal de transporte dos centros de distribuição j para as mesorregiões k para atender clientes B2B

sum(j in CentrosDistribuicao, k in Mesorregioes) CTC[j][k]*ZC[j][k]); //Custo mensal de transporte dos centros de distribuição j para as mesorregiões k para atender clientes B2C

//Restrições

subject to

{ forall (k in Mesorregioes) sum(j in CentrosDistribuicao) X[j][k] == 1;

forall (j in CentrosDistribuicao, k in Mesorregioes) ZB[j][k] == X[j][k]*DB[k];

forall (j in CentrosDistribuicao, k in Mesorregioes) ZC[j][k]== X[j][k]*DC[k];

forall (j in CentrosDistribuicao) sum(k in Mesorregioes) (ZB[j][k]*QB[k] + ZC[j][k]*QC[k]) <= L[j]*Y[j];

forall (i in Fornecedores, j in CentrosDistribuicao) W[i][j] == M[i]*sum (k in Mesorregioes) (ZB[j][k]*QB[k] + ZC[j][k]*QC[k]);

forall (i in Fornecedores, j in CentrosDistribuicao) sum(f in faixas) U[i][j][f] == Y[j];

forall (i in Fornecedores, j in CentrosDistribuicao) W[i][j]/N[i] <= sum(f in faixas) U[i][j][f]*S[f];

}

APÊNDICE B – PARÂMETROS DE ENTRADA PARA O CENÁRIO BASE DO CASO COMPLETO

$N_{\text{fornecedores}} = 6$; $N_{\text{centrosDistribuicao}} = 5$; $N_{\text{mesorregioes}} = 133$; $N_{\text{faixas}} = 18$;

Percentual da demanda total atendido pelo fornecedor i (M_i) e número de entregas por mês realizadas pelo fornecedor i (N_i):

Fornecedor	M_i	N_i
A	64,47%	4
B	3,20%	4
C	24,96%	4
D	6,70%	4
E	0,01%	4
F	0,66%	4

Custo fixo mensal de operação do centro de distribuição j , caso ele seja aberto (CF_j), custo variável unitário de operação (R\$/kg movimentado) do centro de distribuição j (CV_j) e quantidade limite, em kg, que pode ser movimentada por mês a partir do centro de distribuição j (L_j):

Centro de Distribuição	Custo Fixo	Custo Variável	Limite de Expedição
São Paulo	224,955	2.65	501,600
Minas Gerais	160,814	1.89	501,600
Bahia	166,316	1.96	501,600
Espírito Santo	142,901	1.68	501,600
Pernambuco	161,939	1.91	501,600

Demanda total mensal, em número de pedidos, dos clientes B2B da mesorregião k (DB_k), quantidade média, em kg por pedido realizado para clientes B2B da mesorregião k (QB_k), demanda total mensal, em número de pedidos, dos clientes B2C da mesorregião k (DC_k), quantidade média, em kg por pedido, realizado para clientes B2C da mesorregião k (QC_k).

Mesorregião	DB_k	QB_k	DC_k	QC_k
Altamira	0,022	2.591	11,5	8,74
Aracaju	0,533	2.168	75,2	7,28
Araçatuba	0,003	3.314	124,6	3,16
Araguaína	0,150	40	20,3	6,89
Arapiraca	0,285	1.750	44,8	8,73
Araraquara	0,035	3.314	212,4	3,16
Barbacena	0,116	42	100,4	4,48
Barra do Garças	0,000	367	30,5	6,02
Barreiras	0,046	1.008	33,4	6,40
Bauru	1,030	3.314	294,1	3,16
Belém	0,138	2.591	62,4	8,74
Belo Horizonte	0,712	42	1.163,1	4,48
Blumenau	0,252	29	248,0	4,42
Boa Vista	0,323	658	16,7	9,54
Breves	0,012	2.591	8,9	8,74
Caçador	0,096	29	17,3	4,42
Cáceres	0,024	367	17,9	6,02
Cachoeiro do Itapemirim	0,011	4.294	50,8	4,35
Caicó	0,074	90	5,8	7,13
Campina Grande	0,244	198	35,4	8,01
Campinas	1,808	3.314	1.729,9	3,16
Campo Grande	1,579	163	141,1	5,06

Continua

Continuação

Mesorregião	DB_k	QB_k	DC_k	QC_k
Campos dos Goytacazes	0,000	145	97,1	4,28
Caruaru	0,068	1.559	130,2	7,94
Cascavel	0,012	70	165,2	4,35
Castanhal	0,401	2.591	29,0	8,74
Caxias	1,502	120	17,9	8,38
Caxias do Sul	0,000	42	102,3	4,61
Chapecó	0,189	29	87,4	4,42
Colatina	0,000	4.294	28,9	4,35
Corrente - Bom Jesus	0,000	226	6,0	7,84
Corumbá	0,510	163	31,9	5,06
Crateús	0,005	2.132	11,3	7,43
Criciúma	0,027	29	82,0	4,42
Cruzeiro do Sul	0,000	102	5,2	9,41
Cuiabá	0,328	367	110,0	6,02
Curitiba	0,776	70	412,5	4,35
Distrito Federal	1,040	307	542,7	4,27
Divinópolis	0,256	42	112,0	4,48
Dourados	0,335	163	64,1	5,06
Feira de Santana	0,992	1.008	196,9	6,40
Florianópolis	0,034	226	14,0	7,84
Florianópolis	0,030	29	155,2	4,42

Continua

Continuação

Mesorregião	DB_k	QB_k	DC_k	QC_k
Fortaleza	0,583	2.132	153,6	7,43
Goiânia	1,594	3.577	347,8	4,51
Governador Valadares	0,100	42	82,6	4,48
Guanambi	0,019	1.008	31,6	6,40
Guarapuava	0,000	70	21,7	4,35
Gurupi	0,019	40	11,1	6,89
Iguatu	0,004	2.132	7,3	7,43
Ijuí	0,000	42	45,2	4,61
Ilhéus – Itabuna	0,174	1.008	163,9	6,40
Imperatriz	1,539	120	31,9	8,38
Ipatinga	0,141	42	106,5	4,48
Irecê	0,038	1.008	29,3	6,40
Itabaiana	0,041	2.168	18,5	7,28
Itumbiara	0,002	3.577	29,6	4,51
Ji-Paraná	0,211	235	33,4	8,63
João Pessoa	1,610	198	53,7	8,01
Joinville	0,519	29	133,3	4,42
Juazeiro	0,043	1.008	45,1	6,40
Juazeiro do Norte	0,032	2.132	43,2	7,43
Juiz de Fora	0,563	42	260,4	4,48
Lábrea	0,002	2.982	5,2	8,87
Lages	0,000	29	42,2	4,42

Continua

Continuação

Mesorregião	DB_k	QB_k	DC_k	QC_k
Londrina	0,015	70	122,4	4,35
Luziânia - Águas Lindas de Goiás	0,039	3.577	140,3	4,51
Macaé - Rio das Ostras - Cabo Frio	0,000	145	146,1	4,28
Macapá	0,042	394	30,5	10,12
Maceió	0,011	1.750	100,0	8,73
Manaus	0,675	2.982	50,1	8,87
Marabá	0,088	2.591	44,0	8,74
Marília	1,993	3.314	161,3	3,16
Maringá	0,011	70	122,5	4,35
Montes Claros	0,369	42	174,6	4,48
Mossoró	0,027	90	23,3	7,13
Natal	0,475	90	53,7	7,13
Oiapoque - Porto Grande	0,096	394	2,3	10,12
Palmas	0,053	40	23,7	6,89
Parintins	0,004	2.982	2,6	8,87
Parnaíba	0,135	226	18,6	7,84
Passo Fundo	0,100	42	87,7	4,61
Patos	0,262	198	16,2	8,01
Patos de Minas	0,149	42	87,5	4,48
Paulo Afonso	0,020	1.008	42,4	6,40

Continua

Continuação

Mesorregião	DB_k	QB_k	DC_k	QC_k
Pelotas	0,058	42	87,2	4,61
Petrolina	0,008	1.559	54,0	7,94
Petrópolis	0,000	145	99,0	4,28
Picos	0,195	226	26,2	7,84
Ponta Grossa	0,058	70	64,7	4,35
Porangatu - Uruaçu	0,008	3.577	38,8	4,51
Porto Alegre	0,203	42	509,9	4,61
Porto Velho	0,548	235	40,6	8,63
Pouso Alegre	0,235	42	123,3	4,48
Presidente Dutra	0,259	120	11,9	8,38
Presidente Prudente	0,088	3.314	146,2	3,16
Quixadá	0,005	2.132	25,0	7,43
Recife	1,069	1.559	422,8	7,94
Redenção	0,025	2.591	9,4	8,74
Ribeirão Preto	0,115	3.314	458,4	3,16
Rio Branco	0,382	102	17,6	9,41
Rio de Janeiro	0,698	145	1.216,2	4,28
Rio Verde	0,010	3.577	59,5	4,51
Rondonópolis	0,024	367	64,0	6,02
Rorainópolis - Caracaráí	0,003	658	2,8	9,54
Salvador	0,798	1008	502,4	6,40

Continua

Continuação

Mesorregião	DB_k	QB_k	DC_k	QC_k
Santa Cruz do Sul - Lajeado	0,000	42	49,0	4,61
Santa Inês - Bacabal	1,560	120	32,5	8,38
Santa Maria	0,039	42	58,1	4,61
Santarém	0,087	2.591	20,1	8,74
Santo Antônio de Jesus	0,092	1.008	84,0	6,40
São José do Rio Preto	0,481	3.314	238,5	3,16
São José dos Campos	0,087	3.314	673,2	3,16
São Luís	2,023	120	94,7	8,38
São Luís de Montes Belos - Iporá	0,000	3.577	24,1	4,51
São Mateus	0,005	4.294	52,0	4,35
São Paulo	5,092	3.314	7.836,0	3,16
São Raimundo Nonato	0,006	226	3,2	7,84
Serra Talhada	0,000	1.559	17,4	7,94
Sinop	0,020	367	79,2	6,02
Sobral	0,029	2.132	38,4	7,43
Sorocaba	1,008	3.314	602,4	3,16
Sousa - Cajazeiras	0,092	198	5,1	8,01
Tefé	0,000	2.982	1,7	8,87
Teófilo Otoni	0,233	42	128,5	4,48
Teresina	0,951	226	51,6	7,84

Continua

Continuação

Mesorregião	DB_k	QB_k	DC_k	QC_k
Uberaba	0,172	42	82,3	4,48
Uberlândia	0,448	42	156,4	4,48
Uruguaiana	0,000	42	41,4	4,61
Varginha	0,000	42	126,6	4,48
Vitória	0,611	4.294	258,9	4,35
Vitória da Conquista	0,249	1.008	170,2	6,40
Volta Redonda - Barra Mansa	0,000	145	132,6	4,28

Conclusão

Limite superior da faixa de peso f em kg (S_f).

Faixa de Peso	S_f
Faixa 1	2
Faixa 2	4
Faixa 3	6
Faixa 4	8
Faixa 5	10
Faixa 6	20
Faixa 7	30
Faixa 8	50
Faixa 9	70
Faixa 10	100
Faixa 11	150

Continua

Continuação

Faixa de Peso	S_f
Faixa 12	200
Faixa 13	300
Faixa 14	1000
Faixa 15	2000
Faixa 16	3000
Faixa 17	4000
Faixa 18	1000000

Conclusão

Custo de transporte (em R\$ por pedido) entre o centro de distribuição j e a mesorregião k , considerando o perfil de demanda de clientes B2B (CTB_{jk}):

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Altamira	30549,12	30549,12	30549,12	30549,12	30549,12
Aracaju	34676,20	18470,92	8226,51	18470,92	12533,77
Araçatuba	10091,57	15376,88	42547,29	22662,22	42547,29
Araguaína	1251,57	671,72	671,72	1251,57	671,72
Arapiraca	32606,62	17368,91	11786,24	17368,91	7736,15
Araraquara	10091,57	15376,88	22662,22	22662,22	42547,29
Barbacena	475,84	316,01	696,06	316,01	1297,30
Barra do Garças	5234,97	5234,97	5234,97	5234,97	9820,63
Barreiras	8761,03	8761,03	5946,85	8761,03	8761,03
Bauru	3263,46	15376,88	22662,22	22662,22	42547,29

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Belém	30549,12	30549,12	30549,12	30549,12	30549,12
Belo Horizonte	475,84	110,30	696,06	316,01	1297,30
Blumenau	336,91	491,26	912,71	491,26	912,71
Boa Vista	16054,81	16054,81	16054,81	16054,81	16054,81
Breves	30549,12	30549,12	30549,12	30549,12	30549,12
Caçador	336,91	491,26	912,71	491,26	912,71
Cáceres	5234,97	5234,97	9820,63	9820,63	9820,63
Cachoeiro do Itapemirim	25146,49	11196,94	25146,49	11196,94	47212,79
Caicó	2680,58	2680,58	975,50	2680,58	643,77
Campina Grande	5399,08	5399,08	1957,59	2880,35	1288,10
Campinas	10091,57	15376,88	22662,22	15376,88	42547,29
Campo Grande	4495,59	2399,18	1073,90	2399,18	1073,90
Campos dos Goytacazes	1497,22	986,01	2201,78	986,01	4124,97
Caruaru	29285,34	15600,27	10586,46	15600,27	6949,05
Cascavel	765,15	1122,57	2098,25	1122,57	2098,25
Castanhal	30549,12	30549,12	30549,12	30549,12	30549,12
Caxias	3411,51	3411,51	1821,90	3411,51	1821,90
Caxias do Sul	475,28	695,24	1295,75	695,24	1295,75
Chapecó	336,91	491,26	912,71	491,26	912,71

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Colatina	25146,49	11196,94	17062,00	11196,94	25146,49
Corrente - Bom Jesus	3292,32	3292,32	2237,08	3292,32	3292,32
Corumbá	2399,18	2399,18	4495,59	4495,59	4495,59
Crateús	30989,26	30989,26	16507,50	30989,26	11201,79
Criciúma	336,91	491,26	912,71	491,26	912,71
Cruzeiro do Sul	732,97	1633,12	3057,04	1633,12	3057,04
Cuiabá	5234,97	5234,97	9820,63	9820,63	9820,63
Curitiba	505,79	1122,57	2098,25	1122,57	2098,25
Distrito Federal	2668,59	2668,59	3928,46	3928,46	7367,34
Divinópolis	475,84	316,01	696,06	475,84	1297,30
Dourados	1631,15	2399,18	4495,59	2399,18	4495,59
Feira de Santana	8761,03	8761,03	3905,20	8761,03	5946,85
Floriano	6172,70	3292,32	3292,32	3292,32	3292,32
Florianópolis	336,91	491,26	912,71	491,26	912,71
Fortaleza	30989,26	30989,26	16507,50	30989,26	11201,79
Goiânia	16227,11	16227,11	23915,60	23915,60	44901,05
Governador Valadares	696,06	316,01	475,84	316,01	696,06
Guanambi	8761,03	5946,85	5946,85	5946,85	8761,03
Guarapuava	765,15	1122,57	2098,25	1122,57	2098,25
Gurupi	671,72	671,72	671,72	671,72	1251,57

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Iguatu	30989,26	30989,26	11201,79	16507,50	11201,79
Ijuí	695,24	695,24	1295,75	1295,75	1295,75
Ilhéus – Itabuna	8761,03	5946,85	3905,20	5946,85	8761,03
Imperatriz	3411,51	3411,51	1821,90	3411,51	1821,90
Ipatinga	475,84	316,01	696,06	316,01	696,06
Irecê	8761,03	8761,03	5946,85	8761,03	8761,03
Itabaiana	34676,20	34676,20	12533,77	18470,92	8226,51
Itumbiara	16227,11	16227,11	23915,60	23915,60	44901,05
Ji-Paraná	6263,40	6263,40	6263,40	6263,40	6263,40
João Pessoa	5399,08	5399,08	1957,59	5399,08	1288,10
Joinville	336,91	491,26	912,71	491,26	912,71
Juazeiro	16442,31	8761,03	5946,85	8761,03	5946,85
Juazeiro do Norte	30989,26	16507,50	11201,79	16507,50	11201,79
Juiz de Fora	475,84	316,01	696,06	316,01	1297,30
Lábrea	40302,97	40302,97	40302,97	40302,97	40302,97
Lages	336,91	491,26	912,71	491,26	912,71
Londrina	505,79	1122,57	2098,25	1122,57	2098,25
Luziânia - Águas Lindas de Goiás	16227,11	16227,11	23915,60	23915,60	44901,05
Macaé - Rio das Ostras - Cabo Frio	1497,22	986,01	2201,78	986,01	4124,97
Macapá	10497,13	10497,13	10497,13	10497,13	10497,13

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Maceió	32606,62	17368,91	11786,24	17368,91	7736,15
Manaus	40302,97	40302,97	40302,97	40302,97	40302,97
Marabá	30549,12	30549,12	16272,97	30549,12	30549,12
Marília	10091,57	15376,88	42547,29	22662,22	42547,29
Maringá	505,79	1122,57	2098,25	1122,57	2098,25
Montes Claros	696,06	316,01	475,84	475,84	696,06
Mossoró	2680,58	2680,58	1432,66	2680,58	975,50
Natal	2680,58	2680,58	1432,66	2680,58	643,77
Oiapoque - Porto Grande	10497,13	10497,13	10497,13	10497,13	10497,13
Palmas	459,33	671,72	1251,57	671,72	1251,57
Parintins	40302,97	40302,97	40302,97	40302,97	40302,97
Parnaíba	6172,70	6172,70	3292,32	6172,70	3292,32
Passo Fundo	475,28	695,24	1295,75	695,24	1295,75
Patos	5399,08	5399,08	1957,59	2880,35	1288,10
Patos de Minas	475,84	316,01	696,06	475,84	1297,30
Paulo Afonso	16442,31	8761,03	5946,85	8761,03	5946,85
Pelotas	695,24	1295,75	1295,75	1295,75	1295,75
Petrolina	29285,34	15600,27	10586,46	15600,27	10586,46
Petrópolis	1497,22	986,01	2201,78	986,01	4124,97
Picos	6172,70	3292,32	2237,08	3292,32	2237,08

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Ponta Grossa	505,79	1122,57	2098,25	1122,57	2098,25
Porangatu - Uruaçu	23915,60	23915,60	23915,60	23915,60	44901,05
Porto Alegre	695,24	695,24	1295,75	695,24	1295,75
Porto Velho	6263,40	6263,40	6263,40	6263,40	6263,40
Pouso Alegre	316,01	316,01	696,06	475,84	1297,30
Presidente Dutra	1821,90	1821,90	1239,55	1821,90	1821,90
Presidente Prudente	10091,57	22662,22	42547,29	22662,22	42547,29
Quixadá	30989,26	30989,26	16507,50	30989,26	11201,79
Recife	29285,34	29285,34	10586,46	15600,27	2250,16
Redenção	30549,12	16272,97	16272,97	30549,12	30549,12
Ribeirão Preto	10091,57	15376,88	22662,22	22662,22	42547,29
Rio Branco	1633,12	3057,04	3057,04	3057,04	3057,04
Rio de Janeiro	1497,22	986,01	2201,78	1497,22	4124,97
Rio Verde	16227,11	16227,11	23915,60	23915,60	44901,05
Rondonópolis	5234,97	5234,97	9820,63	9820,63	9820,63
Rorainópolis - Caracaraí	16054,81	16054,81	16054,81	16054,81	16054,81
Salvador	8761,03	8761,03	1268,09	8761,03	5946,85
Santa Cruz do Sul - Lajeado	695,24	695,24	1295,75	1295,75	1295,75
Santa Inês - Bacabal	3411,51	3411,51	1821,90	3411,51	1821,90

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Santa Maria	695,24	695,24	1295,75	1295,75	1295,75
Santarém	30549,12	30549,12	30549,12	30549,12	30549,12
Santo Antônio de Jesus	8761,03	8761,03	3905,20	8761,03	5946,85
São José do Rio Preto	10091,57	15376,88	22662,22	22662,22	42547,29
São José dos Campos	10091,57	15376,88	22662,22	15376,88	42547,29
São Luís	3411,51	3411,51	1821,90	3411,51	1821,90
São Luís de Montes Belos - Iporá	16227,11	16227,11	23915,60	23915,60	44901,05
São Mateus	25146,49	17062,00	17062,00	11196,94	25146,49
São Paulo	10091,57	15376,88	22662,22	15376,88	42547,29
São Raimundo Nonato	6172,70	3292,32	2237,08	3292,32	3292,32
Serra Talhada	29285,34	15600,27	10586,46	15600,27	6949,05
Sinop	5234,97	5234,97	9820,63	9820,63	9820,63
Sobral	30989,26	30989,26	16507,50	30989,26	11201,79
Sorocaba	10091,57	15376,88	22662,22	22662,22	42547,29
Sousa - Cajazeiras	5399,08	5399,08	1957,59	2880,35	1957,59
Tefé	40302,97	40302,97	40302,97	40302,97	40302,97
Teófilo Otoni	696,06	316,01	475,84	316,01	696,06

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Teresina	6172,70	6172,70	3292,32	6172,70	3292,32
Uberaba	316,01	475,84	696,06	696,06	1297,30
Uberlândia	475,84	475,84	696,06	696,06	1297,30
Uruguaiana	695,24	1295,75	1295,75	1295,75	1295,75
Varginha	316,01	316,01	696,06	475,84	1297,30
Vitória	25146,49	11196,94	25146,49	3619,73	25146,49
Vitória da Conquista	8761,03	5946,85	3905,20	5946,85	8761,03
Volta Redonda - Barra Mansa	1497,22	986,01	2201,78	1497,22	4124,97

Conclusão

Custo de transporte (em R\$ por pedido) entre o centro de distribuição j e a mesorregião k , considerando o perfil de demanda de clientes B2C (CTC_{jk}):

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Altamira	278,63	278,63	278,63	278,63	278,63
Aracaju	233,44	129,52	63,94	129,52	91,51
Araçatuba	34,06	46,02	107,49	62,46	107,49
Araguaína	221,68	123,26	123,26	221,68	123,26
Arapiraca	278,40	153,46	107,75	153,46	74,58
Araraquara	34,06	46,02	62,46	62,46	107,49
Barbacena	60,62	43,65	83,98	43,65	147,90

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Barra do Garças	109,15	109,15	109,15	109,15	195,17
Barreiras	115,32	115,32	81,87	115,32	115,32
Bauru	19,32	46,02	62,46	62,46	107,49
Belém	278,63	278,63	278,63	278,63	278,63
Belo Horizonte	60,62	22,41	83,98	43,65	147,90
Blumenau	60,01	83,08	146,21	83,08	146,21
Boa Vista	303,38	303,38	303,38	303,38	303,38
Breves	278,63	278,63	278,63	278,63	278,63
Caçador	60,01	83,08	146,21	83,08	146,21
Cáceres	109,15	109,15	195,17	195,17	195,17
Cachoeiro do Itapemirim	81,87	42,71	81,87	42,71	143,94
Caicó	228,99	228,99	89,91	228,99	62,88
Campina Grande	256,10	256,10	99,70	141,59	69,30
Campinas	34,06	46,02	62,46	46,02	107,49
Campo Grande	165,79	93,51	47,89	93,51	47,89
Campos dos Goytacazes	58,40	42,20	80,71	42,20	141,76
Caruaru	254,09	140,52	98,97	140,52	68,82
Cascavel	59,15	81,82	143,85	81,82	143,85
Castanhal	278,63	278,63	278,63	278,63	278,63
Caxias	267,38	267,38	147,59	267,38	147,59

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Caxias do Sul	62,13	86,21	152,08	86,21	152,08
Chapecó	60,01	83,08	146,21	83,08	146,21
Colatina	81,87	42,71	59,18	42,71	81,87
Corrente - Bom Jesus	138,71	138,71	97,75	138,71	138,71
Corumbá	93,51	93,51	165,79	165,79	165,79
Crateús	238,26	238,26	132,09	238,26	93,26
Criciúma	60,01	83,08	146,21	83,08	146,21
Cruzeiro do Sul	79,64	164,81	299,71	164,81	299,71
Cuiabá	109,15	109,15	195,17	195,17	195,17
Curitiba	42,69	81,82	143,85	81,82	143,85
Distrito Federal	58,31	58,31	80,59	80,59	141,52
Divinópolis	60,62	43,65	83,98	60,62	147,90
Dourados	67,08	93,51	165,79	93,51	165,79
Feira de Santana	115,32	115,32	57,60	115,32	81,87
Florianópolis	250,70	138,71	138,71	138,71	138,71
Fortaleza	60,01	83,08	146,21	83,08	146,21
Goiânia	238,26	238,26	132,09	238,26	93,26
Governador Valadares	60,94	60,94	84,46	84,46	148,79
Guanambi	83,98	43,65	60,62	43,65	83,98
	115,32	81,87	81,87	81,87	115,32

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Guarapuava	59,15	81,82	143,85	81,82	143,85
Gurupi	123,26	123,26	123,26	123,26	221,68
Iguatu	238,26	238,26	93,26	132,09	93,26
Ijuí	86,21	86,21	152,08	152,08	152,08
Ilhéus – Itabuna	115,32	81,87	57,60	81,87	115,32
Imperatriz	267,38	267,38	147,59	267,38	147,59
Ipatinga	60,62	43,65	83,98	43,65	83,98
Irecê	115,32	115,32	81,87	115,32	115,32
Itabaiana	233,44	233,44	91,51	129,52	63,94
Itumbiara	60,94	60,94	84,46	84,46	148,79
Ji-Paraná	275,22	275,22	275,22	275,22	275,22
João Pessoa	256,10	256,10	99,70	256,10	69,30
Joinville	60,01	83,08	146,21	83,08	146,21
Juazeiro	206,76	115,32	81,87	115,32	81,87
Juazeiro do Norte	238,26	132,09	93,26	132,09	93,26
Juiz de Fora	60,62	43,65	83,98	43,65	147,90
Lábrea	282,87	282,87	282,87	282,87	282,87
Lages	60,01	83,08	146,21	83,08	146,21
Londrina	42,69	81,82	143,85	81,82	143,85
Luziânia - Águas Lindas de Goiás	60,94	60,94	84,46	84,46	148,79

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Macaé - Rio das Ostras - Cabo Frio	58,40	42,20	80,71	42,20	141,76
Macapá	321,53	321,53	321,53	321,53	321,53
Maceió	278,40	153,46	107,75	153,46	74,58
Manaus	282,87	282,87	282,87	282,87	282,87
Marabá	278,63	278,63	153,58	278,63	278,63
Marília	34,06	46,02	107,49	62,46	107,49
Maringá	42,69	81,82	143,85	81,82	143,85
Montes Claros	83,98	43,65	60,62	60,62	83,98
Mossoró	228,99	228,99	127,15	228,99	89,91
Natal	228,99	228,99	127,15	228,99	62,88
Oiapoque - Porto Grande	321,53	321,53	321,53	321,53	321,53
Palmas	87,27	123,26	221,68	123,26	221,68
Parintins	282,87	282,87	282,87	282,87	282,87
Parnaíba	250,70	250,70	138,71	250,70	138,71
Passo Fundo	62,13	86,21	152,08	86,21	152,08
Patos	256,10	256,10	99,70	141,59	69,30
Patos de Minas	60,62	43,65	83,98	60,62	147,90
Paulo Afonso	206,76	115,32	81,87	115,32	81,87
Pelotas	86,21	152,08	152,08	152,08	152,08
Petrolina	254,09	140,52	98,97	140,52	98,97

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Petrópolis	58,40	42,20	80,71	42,20	141,76
Picos	250,70	138,71	97,75	138,71	97,75
Ponta Grossa	42,69	81,82	143,85	81,82	143,85
Porangatu - Uruaçu	84,46	84,46	84,46	84,46	148,79
Porto Alegre	86,21	86,21	152,08	86,21	152,08
Porto Velho	275,22	275,22	275,22	275,22	275,22
Pouso Alegre	43,65	43,65	83,98	60,62	147,90
Presidente Dutra	147,59	147,59	103,77	147,59	147,59
Presidente Prudente	34,06	62,46	107,49	62,46	107,49
Quixadá	238,26	238,26	132,09	238,26	93,26
Recife	254,09	254,09	98,97	140,52	30,54
Redenção	278,63	153,58	153,58	278,63	278,63
Ribeirão Preto	34,06	46,02	62,46	62,46	107,49
Rio Branco	164,81	299,71	299,71	299,71	299,71
Rio de Janeiro	58,40	42,20	80,71	58,40	141,76
Rio Verde	60,94	60,94	84,46	84,46	148,79
Rondonópolis	109,15	109,15	195,17	195,17	195,17
Rorainópolis - Caracará	303,38	303,38	303,38	303,38	303,38
Salvador	115,32	115,32	26,92	115,32	81,87

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Santa Cruz do Sul - Lajeado	86,21	86,21	152,08	152,08	152,08
Santa Inês - Bacabal	267,38	267,38	147,59	267,38	147,59
Santa Maria	86,21	86,21	152,08	152,08	152,08
Santarém	278,63	278,63	278,63	278,63	278,63
Santo Antônio de Jesus	115,32	115,32	57,60	115,32	81,87
São José do Rio Preto	34,06	46,02	62,46	62,46	107,49
São José dos Campos	34,06	46,02	62,46	46,02	107,49
São Luís	267,38	267,38	147,59	267,38	147,59
São Luís de Montes Belos - Iporá	60,94	60,94	84,46	84,46	148,79
São Mateus	81,87	59,18	59,18	42,71	81,87
São Paulo	34,06	46,02	62,46	46,02	107,49
São Raimundo Nonato	250,70	138,71	97,75	138,71	138,71
Serra Talhada	254,09	140,52	98,97	140,52	68,82
Sinop	109,15	109,15	195,17	195,17	195,17
Sobral	238,26	238,26	132,09	238,26	93,26
Sorocaba	34,06	46,02	62,46	62,46	107,49
Sousa - Cajazeiras	256,10	256,10	99,70	141,59	99,70

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Tefé	282,87	282,87	282,87	282,87	282,87
Teófilo Otoni	83,98	43,65	60,62	43,65	83,98
Teresina	250,70	250,70	138,71	250,70	138,71
Uberaba	43,65	60,62	83,98	83,98	147,90
Uberlândia	60,62	60,62	83,98	83,98	147,90
Uruguaiana	86,21	152,08	152,08	152,08	152,08
Varginha	43,65	43,65	83,98	60,62	147,90
Vitória	81,87	42,71	81,87	22,11	81,87
Vitória da Conquista	115,32	81,87	57,60	81,87	115,32
Volta Redonda - Barra Mansa	58,40	42,20	80,71	58,40	141,76

Conclusão

Custo de transporte (em R\$ por entrega) entre o fornecedor A e o centro de distribuição j , por faixa de peso f (CT_{Aj}^f).

CD Faixa de peso	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
1	18,42	22,25	27,43	27,43	41,69
2	32,93	44,28	59,90	59,90	102,66
3	47,43	66,30	92,36	92,36	163,62
4	61,86	88,33	124,83	124,83	224,62
5	76,29	110,36	157,30	157,30	285,63
6	119,59	176,44	254,70	254,70	468,64
7	195,47	292,08	425,15	425,15	788,48
8	303,06	456,12	666,99	666,99	1242,67
9	444,59	671,87	985,06	985,06	1840,00
10	618,95	937,66	1376,87	1376,87	2575,79
11	886,52	1345,55	1978,20	1978,20	3705,10
12	1210,89	1840,02	2707,14	2707,14	5074,00
13	1520,51	2312,00	3402,93	3402,93	6380,67
14	4085,23	6221,07	9165,08	9165,08	17200,72
15	7753,67	11812,77	17407,85	17407,85	32679,46
16	10149,56	15465,06	22792,01	22792,01	42790,66
17	11623,88	17712,55	26105,26	26105,26	49012,85
18	13282,06	20240,55	29832,26	29832,26	56012,42

Custo de transporte (em R\$ por entrega) entre o fornecedor B e o centro de distribuição j , por faixa de peso f CT_{Bj}^f .

CD Faixa de peso	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
1	14,28	22,25	27,43	27,43	41,69
2	18,95	44,28	59,90	59,90	102,66
3	23,62	66,30	92,36	92,36	163,62
4	28,29	88,33	124,83	124,83	224,62
5	32,96	110,36	157,30	157,30	285,63
6	46,96	176,44	254,70	254,70	468,64
7	71,46	292,08	425,15	425,15	788,48
8	106,13	456,12	666,99	666,99	1242,67
9	151,75	671,87	985,06	985,06	1840,00
10	207,98	937,66	1376,87	1376,87	2575,79
11	294,22	1345,55	1978,20	1978,20	3705,10
12	398,82	1840,02	2707,14	2707,14	5074,00
13	498,64	2312,00	3402,93	3402,93	6380,67
14	1326,44	6221,07	9165,08	9165,08	17200,72
15	2509,95	11812,77	17407,85	17407,85	32679,46
16	3282,48	15465,06	22792,01	22792,01	42790,66
17	3757,79	17712,55	26105,26	26105,26	49012,85
18	4292,07	20240,55	29832,26	29832,26	56012,42

Custo de transporte (em R\$ por entrega) entre o fornecedor C e o centro de distribuição j , por faixa de peso f CT_{cj}^f

Faixa de peso \ CD	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
1	14,28	22,25	27,43	27,43	41,69
2	18,95	44,28	59,90	59,90	102,66
3	23,62	66,30	92,36	92,36	163,62
4	28,29	88,33	124,83	124,83	224,62
5	32,96	110,36	157,30	157,30	285,63
6	46,96	176,44	254,70	254,70	468,64
7	71,46	292,08	425,15	425,15	788,48
8	106,13	456,12	666,99	666,99	1242,67
9	151,75	671,87	985,06	985,06	1840,00
10	207,98	937,66	1376,87	1376,87	2575,79
11	294,22	1345,55	1978,20	1978,20	3705,10
12	398,82	1840,02	2707,14	2707,14	5074,00
13	498,64	2312,00	3402,93	3402,93	6380,67
14	1326,44	6221,07	9165,08	9165,08	17200,72
15	2509,95	11812,77	17407,85	17407,85	32679,46
16	3282,48	15465,06	22792,01	22792,01	42790,66
17	3757,79	17712,55	26105,26	26105,26	49012,85
18	4292,07	20240,55	29832,26	29832,26	56012,42

Custo de transporte (em R\$ por entrega) entre o fornecedor D e o centro de distribuição j , por faixa de peso f CT_{Dj}^f

CD Faixa de peso	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
1	18,42	22,25	41,69	27,43	41,69
2	32,93	44,28	102,66	59,90	102,66
3	47,43	66,30	163,62	92,36	163,62
4	61,86	88,33	224,62	124,83	224,62
5	76,29	110,36	285,63	157,30	285,63
6	119,59	176,44	468,64	254,70	468,64
7	195,47	292,08	788,48	425,15	788,48
8	303,06	456,12	1242,67	666,99	1242,67
9	444,59	671,87	1840,00	985,06	1840,00
10	618,95	937,66	2575,79	1376,87	2575,79
11	886,52	1345,55	3705,10	1978,20	3705,10
12	1210,89	1840,02	5074,00	2707,14	5074,00
13	1520,51	2312,00	6380,67	3402,93	6380,67
14	4085,23	6221,07	17200,72	9165,08	17200,72
15	7753,67	11812,77	32679,46	17407,85	32679,46
16	10149,56	15465,06	42790,66	22792,01	42790,66
17	11623,88	17712,55	49012,85	26105,26	49012,85
18	13282,06	20240,55	56012,42	29832,26	56012,42

Custo de transporte (em R\$ por entrega) entre o fornecedor E e o centro de distribuição j , por faixa de peso f CT_{Ej}^f

Faixa de peso \ CD	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
1	18,42	22,25	27,43	22,25	41,69
2	32,93	44,28	59,90	44,28	102,66
3	47,43	66,30	92,36	66,30	163,62
4	61,86	88,33	124,83	88,33	224,62
5	76,29	110,36	157,30	110,36	285,63
6	119,59	176,44	254,70	176,44	468,64
7	195,47	292,08	425,15	292,08	788,48
8	303,06	456,12	666,99	456,12	1242,67
9	444,59	671,87	985,06	671,87	1840,00
10	618,95	937,66	1376,87	937,66	2575,79
11	886,52	1345,55	1978,20	1345,55	3705,10
12	1210,89	1840,02	2707,14	1840,02	5074,00
13	1520,51	2312,00	3402,93	2312,00	6380,67
14	4085,23	6221,07	9165,08	6221,07	17200,72
15	7753,67	11812,77	17407,85	11812,77	32679,46
16	10149,56	15465,06	22792,01	15465,06	42790,66
17	11623,88	17712,55	26105,26	17712,55	49012,85
18	13282,06	20240,55	29832,26	20240,55	56012,42

Custo de transporte (em R\$ por entrega) entre o fornecedor F e o centro de distribuição j , por faixa de peso f CT_{Fj}^f

CD Faixa de peso	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
1	14,28	22,25	27,43	27,43	41,69
2	18,95	44,28	59,90	59,90	102,66
3	23,62	66,30	92,36	92,36	163,62
4	28,29	88,33	124,83	124,83	224,62
5	32,96	110,36	157,30	157,30	285,63
6	46,96	176,44	254,70	254,70	468,64
7	71,46	292,08	425,15	425,15	788,48
8	106,13	456,12	666,99	666,99	1242,67
9	151,75	671,87	985,06	985,06	1840,00
10	207,98	937,66	1376,87	1376,87	2575,79
11	294,22	1345,55	1978,20	1978,20	3705,10
12	398,82	1840,02	2707,14	2707,14	5074,00
13	498,64	2312,00	3402,93	3402,93	6380,67
14	1326,44	6221,07	9165,08	9165,08	17200,72
15	2509,95	11812,77	17407,85	17407,85	32679,46
16	3282,48	15465,06	22792,01	22792,01	42790,66
17	3757,79	17712,55	26105,26	26105,26	49012,85
18	4292,07	20240,55	29832,26	29832,26	56012,42

APÊNDICE C – RESULTADOS OBTIDOS PARA TODAS AS VARIÁVEIS NO CENÁRIO BASE DO CASO COMPLETO

Y_j - Variáveis binárias que indicam se os centros de distribuição j serão abertos (1 se sim, 0 se não):

Centro de Distribuição	Y_j
São Paulo	1
Minas Gerais	0
Bahia	1
Espírito Santo	0
Pernambuco	0

W_{ij} - Variáveis de decisão que indicam a quantidade, em kg, transportada dos fornecedores i para os centros de distribuição j .

Fornecedor CD	A	B	C	D	E	F
São Paulo	87653,89	4353,80	33939,29	9116,10	9,92	898,01
Minas Gerais	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bahia	20656,92	1026,04	7998,29	2148,34	2,34	211,63
Espírito Santo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Pernambuco	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

X_{jk} - Variáveis binárias que indicam se a demanda das mesorregiões k serão atendidas pelos centros de distribuição j (1 se sim, 0 se não)

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Altamira	1	0	0	0	0
Aracaju	0	0	1	0	0
Araçatuba	1	0	0	0	0
Araguaína	0	0	1	0	0
Arapiraca	0	0	1	0	0
Araraquara	1	0	0	0	0
Barbacena	1	0	0	0	0
Barra do Garças	1	0	0	0	0
Barreiras	1	0	0	0	0
Bauru	1	0	0	0	0
Belém	1	0	0	0	0
Belo Horizonte	1	0	0	0	0
Blumenau	1	0	0	0	0
Boa Vista	1	0	0	0	0
Breves	1	0	0	0	0
Caçador	1	0	0	0	0
Cáceres	1	0	0	0	0
Cachoeiro do Itapemirim	1	0	0	0	0
Caicó	0	0	1	0	0
Campina Grande	0	0	1	0	0

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Campinas	1	0	0	0	0
Campo Grande	0	0	1	0	0
Campos dos Goytacazes	1	0	0	0	0
Caruaru	0	0	1	0	0
Cascavel	1	0	0	0	0
Castanhal	1	0	0	0	0
Caxias	0	0	1	0	0
Caxias do Sul	1	0	0	0	0
Chapecó	1	0	0	0	0
Colatina	0	0	1	0	0
Corrente - Bom Jesus	1	0	0	0	0
Corumbá	1	0	0	0	0
Crateús	0	0	1	0	0
Criciúma	1	0	0	0	0
Cruzeiro do Sul	1	0	0	0	0
Cuiabá	1	0	0	0	0
Curitiba	1	0	0	0	0
Distrito Federal	1	0	0	0	0
Divinópolis	1	0	0	0	0
Dourados	1	0	0	0	0

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Feira de Santana	0	0	1	0	0
Floriano	0	0	1	0	0
Florianópolis	1	0	0	0	0
Fortaleza	0	0	1	0	0
Goiânia	1	0	0	0	0
Governador Valadares	1	0	0	0	0
Guanambi	1	0	0	0	0
Guarapuava	1	0	0	0	0
Gurupi	1	0	0	0	0
Iguatu	0	0	1	0	0
Ijuí	1	0	0	0	0
Ilhéus – Itabuna	0	0	1	0	0
Imperatriz	0	0	1	0	0
Ipatinga	1	0	0	0	0
Irecê	1	0	0	0	0
Itabaiana	0	0	1	0	0
Itumbiara	1	0	0	0	0
Ji-Paraná	1	0	0	0	0
João Pessoa	0	0	1	0	0
Joinville	1	0	0	0	0
Juazeiro	0	0	1	0	0

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Juazeiro do Norte	0	0	1	0	0
Juiz de Fora	1	0	0	0	0
Lábrea	1	0	0	0	0
Lages	1	0	0	0	0
Londrina	1	0	0	0	0
Luziânia - Águas Lindas de Goiás	1	0	0	0	0
Macaé - Rio das Ostras - Cabo Frio	1	0	0	0	0
Macapá	1	0	0	0	0
Maceió	0	0	1	0	0
Manaus	1	0	0	0	0
Marabá	0	0	1	0	0
Marília	1	0	0	0	0
Maringá	1	0	0	0	0
Montes Claros	1	0	0	0	0
Mossoró	0	0	1	0	0
Natal	0	0	1	0	0
Oiapoque - Porto Grande	1	0	0	0	0
Palmas	1	0	0	0	0
Parintins	1	0	0	0	0

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Parnaíba	0	0	1	0	0
Passo Fundo	1	0	0	0	0
Patos	0	0	1	0	0
Patos de Minas	1	0	0	0	0
Paulo Afonso	0	0	1	0	0
Pelotas	1	0	0	0	0
Petrolina	0	0	1	0	0
Petrópolis	1	0	0	0	0
Picos	0	0	1	0	0
Ponta Grossa	1	0	0	0	0
Porangatu - Uruaçu	1	0	0	0	0
Porto Alegre	1	0	0	0	0
Porto Velho	1	0	0	0	0
Pouso Alegre	1	0	0	0	0
Presidente Dutra	1	0	0	0	0
Presidente Prudente	1	0	0	0	0
Quixadá	0	0	1	0	0
Recife	0	0	1	0	0
Redenção	0	0	1	0	0
Ribeirão Preto	1	0	0	0	0
Rio Branco	1	0	0	0	0

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Rio de Janeiro	1	0	0	0	0
Rio Verde	1	0	0	0	0
Rondonópolis	1	0	0	0	0
Rorainópolis - Caracaraí	1	0	0	0	0
Salvador	0	0	1	0	0
Santa Cruz do Sul - Lajeado	1	0	0	0	0
Santa Inês - Bacabal	0	0	1	0	0
Santa Maria	1	0	0	0	0
Santarém	1	0	0	0	0
Santo Antônio de Jesus	0	0	1	0	0
São José do Rio Preto	1	0	0	0	0
São José dos Campos	1	0	0	0	0
São Luís	0	0	1	0	0
São Luís de Montes Belos - Iporá	1	0	0	0	0
São Mateus	1	0	0	0	0
São Paulo	1	0	0	0	0

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
São Raimundo Nonato	0	0	1	0	0
Serra Talhada	0	0	1	0	0
Sinop	1	0	0	0	0
Sobral	0	0	1	0	0
Sorocaba	1	0	0	0	0
Sousa - Cajazeiras	0	0	1	0	0
Tefé	1	0	0	0	0
Teófilo Otoni	0	0	1	0	0
Teresina	0	0	1	0	0
Uberaba	1	0	0	0	0
Uberlândia	1	0	0	0	0
Uruguaiana	1	0	0	0	0
Varginha	1	0	0	0	0
Vitória	1	0	0	0	0
Vitória da Conquista	0	0	1	0	0
Volta Redonda - Barra Mansa	1	0	0	0	0

Conclusão

ZB_{jk} - Variáveis de decisão que indicam o número de pedidos entregues dos CDs j para as mesorregiões k para atender clientes B2B;

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Altamira	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Aracaju	0,00	0,00	0,53	0,00	0,00
Araçatuba	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Araguaína	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00
Arapiraca	0,00	0,00	0,29	0,00	0,00
Araraquara	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Barbacena	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
Barra do Garças	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Barreiras	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Bauru	1,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Belém	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00
Belo Horizonte	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00
Blumenau	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00
Boa Vista	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00
Breves	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Caçador	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
Cáceres	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Cachoeiro do Itapemirim	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Caicó	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00
Campina Grande	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Campinas	1,81	0,00	0,00	0,00	0,00
Campo Grande	0,00	0,00	1,58	0,00	0,00
Campos dos Goytacazes	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Caruaru	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00
Cascavel	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Castanhal	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00
Caxias	0,00	0,00	1,50	0,00	0,00
Caxias do Sul	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Chapecó	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00
Colatina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Corrente - Bom Jesus	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Corumbá	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00
Crateús	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Criciúma	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Cruzeiro do Sul	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cuiabá	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00
Curitiba	0,78	0,00	0,00	0,00	0,00
Distrito Federal	1,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Divinópolis	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00
Dourados	0,33	0,00	0,00	0,00	0,00

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Feira de Santana	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00
Floriano	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
Florianópolis	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Fortaleza	0,00	0,00	0,58	0,00	0,00
Goiânia	1,59	0,00	0,00	0,00	0,00
Governador Valadares	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
Guanambi	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Guarapuava	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Gurupi	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Iguatu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ijuí	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ilhéus – Itabuna	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00
Imperatriz	0,00	0,00	1,54	0,00	0,00
Ipatinga	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00
Irecê	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Itabaiana	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00
Itumbiara	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ji-Paraná	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00
João Pessoa	0,00	0,00	1,61	0,00	0,00
Joinville	0,52	0,00	0,00	0,00	0,00
Juazeiro	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Juazeiro do Norte	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
Juiz de Fora	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00
Lábrea	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lages	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Londrina	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Luziânia - Águas Lindas de Goiás	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Macaé - Rio das Ostras - Cabo Frio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Macapá	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Maceió	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Manaus	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00
Marabá	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00
Marília	1,99	0,00	0,00	0,00	0,00
Maringá	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Montes Claros	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00
Mossoró	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
Natal	0,00	0,00	0,47	0,00	0,00
Oiapoque - Porto Grande	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
Palmas	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
Parintins	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Parnaíba	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00
Passo Fundo	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00
Patos	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00
Patos de Minas	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
Paulo Afonso	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
Pelotas	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
Petrolina	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Petrópolis	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Picos	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00
Ponta Grossa	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00
Porangatu - Uruaçu	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Porto Alegre	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
Porto Velho	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00
Pouso Alegre	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00
Presidente Dutra	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00
Presidente Prudente	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
Quixadá	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Recife	0,00	0,00	1,07	0,00	0,00
Redenção	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
Ribeirão Preto	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00
Rio Branco	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Rio de Janeiro	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00
Rio Verde	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Rondonópolis	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Rorainópolis - Caracaraí	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Salvador	0,00	0,00	0,80	0,00	0,00
Santa Cruz do Sul - Lajeado	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Santa Inês - Bacabal	0,00	0,00	1,56	0,00	0,00
Santa Maria	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Santarém	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
Santo Antônio de Jesus	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00
São José do Rio Preto	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00
São José dos Campos	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
São Luís	0,00	0,00	2,02	0,00	0,00
São Luís de Montes Belos - Iporá	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
São Mateus	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
São Paulo	5,09	0,00	0,00	0,00	0,00

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
São Raimundo Nonato	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Serra Talhada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sinop	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Sobral	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
Sorocaba	1,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Sousa - Cajazeiras	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00
Tefé	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Teófilo Otoni	0,00	0,00	0,23	0,00	0,00
Teresina	0,00	0,00	0,95	0,00	0,00
Uberaba	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00
Uberlândia	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00
Uruguaiana	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Varginha	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Vitória	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00
Vitória da Conquista	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00
Volta Redonda - Barra Mansa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Conclusão

ZC_{jk} - Variáveis de decisão que indicam o número de pedidos entregues dos CDs j para as mesorregiões k para atender clientes B2B;

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Altamira	11,46	0,00	0,00	0,00	0,00
Aracaju	0,00	0,00	75,16	0,00	0,00
Araçatuba	124,56	0,00	0,00	0,00	0,00
Araguaína	0,00	0,00	20,26	0,00	0,00
Arapiraca	0,00	0,00	44,77	0,00	0,00
Araraquara	212,42	0,00	0,00	0,00	0,00
Barbacena	100,37	0,00	0,00	0,00	0,00
Barra do Garças	30,46	0,00	0,00	0,00	0,00
Barreiras	33,41	0,00	0,00	0,00	0,00
Bauru	294,14	0,00	0,00	0,00	0,00
Belém	62,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Belo Horizonte	1163,13	0,00	0,00	0,00	0,00
Blumenau	248,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Boa Vista	16,68	0,00	0,00	0,00	0,00
Breves	8,94	0,00	0,00	0,00	0,00
Caçador	17,28	0,00	0,00	0,00	0,00
Cáceres	17,85	0,00	0,00	0,00	0,00
Cachoeiro do Itapemirim	50,80	0,00	0,00	0,00	0,00
Caicó	0,00	0,00	5,77	0,00	0,00
Campina Grande	0,00	0,00	35,43	0,00	0,00

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Campinas	1729,91	0,00	0,00	0,00	0,00
Campo Grande	0,00	0,00	141,13	0,00	0,00
Campos dos Goytacazes	97,11	0,00	0,00	0,00	0,00
Caruaru	0,00	0,00	130,23	0,00	0,00
Cascavel	165,20	0,00	0,00	0,00	0,00
Castanhal	28,98	0,00	0,00	0,00	0,00
Caxias	0,00	0,00	17,91	0,00	0,00
Caxias do Sul	102,26	0,00	0,00	0,00	0,00
Chapecó	87,39	0,00	0,00	0,00	0,00
Colatina	0,00	0,00	28,86	0,00	0,00
Corrente - Bom Jesus	6,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Corumbá	31,95	0,00	0,00	0,00	0,00
Crateús	0,00	0,00	11,35	0,00	0,00
Criciúma	82,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Cruzeiro do Sul	5,21	0,00	0,00	0,00	0,00
Cuiabá	110,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Curitiba	412,49	0,00	0,00	0,00	0,00
Distrito Federal	542,68	0,00	0,00	0,00	0,00
Divinópolis	112,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dourados	64,10	0,00	0,00	0,00	0,00

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Feira de Santana	0,00	0,00	196,86	0,00	0,00
Floriano	0,00	0,00	13,96	0,00	0,00
Florianópolis	155,25	0,00	0,00	0,00	0,00
Fortaleza	0,00	0,00	153,64	0,00	0,00
Goiânia	347,80	0,00	0,00	0,00	0,00
Governador Valadares	82,60	0,00	0,00	0,00	0,00
Guanambi	31,58	0,00	0,00	0,00	0,00
Guarapuava	21,67	0,00	0,00	0,00	0,00
Gurupi	11,09	0,00	0,00	0,00	0,00
Iguatu	0,00	0,00	7,33	0,00	0,00
Ijuí	45,23	0,00	0,00	0,00	0,00
Ilhéus – Itabuna	0,00	0,00	163,92	0,00	0,00
Imperatriz	0,00	0,00	31,94	0,00	0,00
Ipatinga	106,49	0,00	0,00	0,00	0,00
Irecê	29,27	0,00	0,00	0,00	0,00
Itabaiana	0,00	0,00	18,51	0,00	0,00
Itumbiara	29,65	0,00	0,00	0,00	0,00
Ji-Paraná	33,43	0,00	0,00	0,00	0,00
João Pessoa	0,00	0,00	53,75	0,00	0,00
Joinville	133,32	0,00	0,00	0,00	0,00
Juazeiro	0,00	0,00	45,15	0,00	0,00

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Juazeiro do Norte	0,00	0,00	43,19	0,00	0,00
Juiz de Fora	260,42	0,00	0,00	0,00	0,00
Lábrea	5,16	0,00	0,00	0,00	0,00
Lages	42,22	0,00	0,00	0,00	0,00
Londrina	122,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Luziânia - Águas Lindas de Goiás	140,27	0,00	0,00	0,00	0,00
Macaé - Rio das Ostras - Cabo Frio	146,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Macapá	30,54	0,00	0,00	0,00	0,00
Maceió	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
Manaus	50,10	0,00	0,00	0,00	0,00
Marabá	0,00	0,00	43,98	0,00	0,00
Marília	161,29	0,00	0,00	0,00	0,00
Maringá	122,49	0,00	0,00	0,00	0,00
Montes Claros	174,55	0,00	0,00	0,00	0,00
Mossoró	0,00	0,00	23,34	0,00	0,00
Natal	0,00	0,00	53,70	0,00	0,00
Oiapoque - Porto Grande	2,28	0,00	0,00	0,00	0,00
Palmas	23,71	0,00	0,00	0,00	0,00
Parintins	2,62	0,00	0,00	0,00	0,00

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Parnaíba	0,00	0,00	18,58	0,00	0,00
Passo Fundo	87,71	0,00	0,00	0,00	0,00
Patos	0,00	0,00	16,25	0,00	0,00
Patos de Minas	87,54	0,00	0,00	0,00	0,00
Paulo Afonso	0,00	0,00	42,42	0,00	0,00
Pelotas	87,16	0,00	0,00	0,00	0,00
Petrolina	0,00	0,00	54,02	0,00	0,00
Petrópolis	99,04	0,00	0,00	0,00	0,00
Picos	0,00	0,00	26,17	0,00	0,00
Ponta Grossa	64,67	0,00	0,00	0,00	0,00
Porangatu - Uruaçu	38,76	0,00	0,00	0,00	0,00
Porto Alegre	509,89	0,00	0,00	0,00	0,00
Porto Velho	40,57	0,00	0,00	0,00	0,00
Pouso Alegre	123,35	0,00	0,00	0,00	0,00
Presidente Dutra	11,89	0,00	0,00	0,00	0,00
Presidente Prudente	146,15	0,00	0,00	0,00	0,00
Quixadá	0,00	0,00	24,99	0,00	0,00
Recife	0,00	0,00	422,81	0,00	0,00
Redenção	0,00	0,00	9,42	0,00	0,00
Ribeirão Preto	458,35	0,00	0,00	0,00	0,00
Rio Branco	17,60	0,00	0,00	0,00	0,00

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
Rio de Janeiro	1216,22	0,00	0,00	0,00	0,00
Rio Verde	59,53	0,00	0,00	0,00	0,00
Rondonópolis	64,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rorainópolis - Caracaraí	2,83	0,00	0,00	0,00	0,00
Salvador	0,00	0,00	502,36	0,00	0,00
Santa Cruz do Sul - Lajeado	48,95	0,00	0,00	0,00	0,00
Santa Inês - Bacabal	0,00	0,00	32,45	0,00	0,00
Santa Maria	58,07	0,00	0,00	0,00	0,00
Santarém	20,12	0,00	0,00	0,00	0,00
Santo Antônio de Jesus	0,00	0,00	84,04	0,00	0,00
São José do Rio Preto	238,52	0,00	0,00	0,00	0,00
São José dos Campos	673,19	0,00	0,00	0,00	0,00
São Luís	0,00	0,00	94,66	0,00	0,00
São Luís de Montes Belos - Iporá	24,07	0,00	0,00	0,00	0,00
São Mateus	51,96	0,00	0,00	0,00	0,00
São Paulo	7835,96	0,00	0,00	0,00	0,00

Continua

Continuação

CD Mesorregião	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
São Raimundo Nonato	0,00	0,00	3,22	0,00	0,00
Serra Talhada	0,00	0,00	17,37	0,00	0,00
Sinop	79,22	0,00	0,00	0,00	0,00
Sobral	0,00	0,00	38,39	0,00	0,00
Sorocaba	602,36	0,00	0,00	0,00	0,00
Sousa - Cajazeiras	0,00	0,00	5,07	0,00	0,00
Tefé	1,73	0,00	0,00	0,00	0,00
Teófilo Otoni	0,00	0,00	128,46	0,00	0,00
Teresina	0,00	0,00	51,57	0,00	0,00
Uberaba	82,32	0,00	0,00	0,00	0,00
Uberlândia	156,39	0,00	0,00	0,00	0,00
Uruguaiana	41,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Varginha	126,57	0,00	0,00	0,00	0,00
Vitória	258,85	0,00	0,00	0,00	0,00
Vitória da Conquista	0,00	0,00	170,21	0,00	0,00
Volta Redonda - Barra Mansa	132,64	0,00	0,00	0,00	0,00

Conclusão

U_{Aj}^f - Variáveis binárias que indicam se a quantidade movimentada por pedido entre o fornecedor A e os centros de distribuição j estão nas faixas de peso f (1 se sim, 0 se não):

Faixa de peso \ CD	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0
18	1	0	1	0	0

U_{Bj}^f - Variáveis binárias que indicam se a quantidade movimentada por pedido entre o fornecedor B e os centros de distribuição j estão nas faixas de peso f (1 se sim, 0 se não):

CD Faixa de peso	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
13	0	0	1	0	0
14	0	0	0	0	0
15	1	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0

U_{Cj}^f - Variáveis binárias que indicam se a quantidade movimentada por pedido entre o fornecedor C e os centros de distribuição j estão nas faixas de peso f (1 se sim, 0 se não):

Faixa de peso \ CD	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	0	1	0	0
16	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0
18	1	0	0	0	0

U_{Dj}^f - Variáveis binárias que indicam se a quantidade movimentada por pedido entre o fornecedor D e os centros de distribuição j estão nas faixas de peso f (1 se sim, 0 se não):

Faixa de peso \ CD	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0
14	0	0	1	0	0
15	0	0	0	0	0
16	1	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0

U_{Ej}^f - Variáveis binárias que indicam se a quantidade movimentada por pedido entre o fornecedor E e os centros de distribuição j estão nas faixas de peso f (1 se sim, 0 se não):

Faixa de peso \ CD	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
1	0	0	1	0	0
2	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0

U_{Fj}^f - Variáveis binárias que indicam se a quantidade movimentada por pedido entre o fornecedor F e os centros de distribuição j estão nas faixas de peso f (1 se sim, 0 se não):

CD Faixa de peso	São Paulo	Minas Gerais	Bahia	Espírito Santo	Pernambuco
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0
10	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0
13	1	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0