

Artigo Técnico

Técnicas de programação matemática aplicadas ao problema de localização ótima de centros de distribuição em e-commerce

Mathematical programming techniques applied to the logistics distribution centers location problem in e-commerce

Willelberg dos Anjos Cruz^{a*}, Marcel Joly^{b,c}

^a Mestrado em Processos Industriais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, S.A., São Paulo, Brasil.

^b ARSESP- Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo

^c Docente do Mestrado Profissional em Processos Industriais

*e-mail: wil_mec@hotmail.com

Palavras-chave: centros de distribuição, otimização, programação matemática, logística de operações, e-commerce.

Keywords: distribution centers, optimization, mathematical programming, operations logistics, e-commerce.

Resumo

Este artigo propõe modelos de otimização baseados em técnicas de programação matemática para apoiar decisões estratégicas relativas à localização ótima de novos centros de distribuição que venham a operar no modelo de comércio eletrônico (*e-commerce*). Em particular, o problema estudado enfoca a logística de distribuição de alimentos frescos comercializados diretamente através da Internet. O objetivo é minimizar o custo integrado da operação logística considerando restrições operacionais (e.g., disponibilidade de recursos) e comerciais (e.g., nível de serviço) tipicamente presentes nesta área de negócio. Especificamente, modelos de otimização baseados em programação linear inteira-mista (*mixed-integer linear programming*, MILP) bem como as técnicas de solução são aqui propostos e implementados em linguagem de alto nível através de uma plataforma comercial de modelagem algébrica (GAMS). A metodologia proposta provou-se eficiente computacionalmente para a resolução de cenários realísticos do problema endereçado, revelando-se, ainda, uma abordagem promissora para consideração em pesquisa futura orientada à otimização estratégica, tática e operacional do negócio. Além disso, a capacidade dessa metodologia de abordar outros problemas logísticos semelhantes pode tornar este trabalho atraente para um público mais amplo.

Abstract

This article presents optimization models based on mathematical programming techniques aimed to support strategic decisions regarding the optimal location of new distribution centers in e-commerce. In particular, the problem focuses on the distribution logistics of fresh food sold directly over the Internet. The objective is to minimize the integrated cost of the logistics operation regarding operational (e.g., resource availability) and commercial (e.g., service level agreements) constraints which are typically present in the real-world problem. Specifically, optimization models based on mixed-integer linear programming (MILP) as well as their solution techniques are proposed here and implemented in high-level language by using a commercial modeling platform (GAMS). The methodology proposed proved to be computationally efficient for solving realistic instances of the problem, also proving to be a promising approach for consideration in future research directed towards tactical and operational decision support. Moreover, the ability of this methodology to be extended to address other similar logistic problems can make this work appeal to a broader audience.

1 Introdução

No Brasil, o incremento significativo do uso de tecnologias de comércio eletrônico, o *e-commerce*, produziu, como uma consequência, o aumento da concorrência no mercado de varejo. E diversos fatores indicam que essa tendência irá aumentar de forma acentuada nos próximos anos. Atualmente, a parcela das vendas de varejo por meio do *e-commerce* é da ordem de 9,3% do total de vendas registradas no país. Conforme revelado pelo índice McC-Enet, em anos recentes o *e-commerce* tem crescido cerca de 70% no Brasil (E-COMMERCEBRASIL, 2021). Vale ressaltar que o recente e expressivo aumento de vendas via plataformas tecnológicas baseadas na Internet foi ainda exacerbado após o início da pandemia do COVID-19. Não obstante, recentes pesquisas de mercado indicam que há um potencial para que, nos próximos anos, 20% de toda venda do varejo seja realizada através de alguma plataforma tecnológica, ou seja, a expectativa é de que a quantidade de vendas do varejo brasileiro através do *e-commerce* evolua para o dobro do que é verificado hoje (E-COMMERCEBRASIL, 2021).

Atualmente, há diversas empresas que atuam no *e-commerce* brasileiro, como, por exemplo, Magazine Luiza, Lojas Americanas, Mercado Livre, Amazon e Shopee. O rol dessas empresas tem se expandido de forma permanente ao longo dos anos, visto que, como mencionado, o potencial mercadológico do país ainda oferece oportunidades relevantes a serem exploradas, não apenas em razão da dimensão geográfica e do tamanho da população, mas também em razão da mudança cultural quanto à forma de comprar, processo este ainda catalisado pela pandemia COVID-19.

Não supreendentemente, a quantidade de investimento em tecnologias e infraestruturas para implantação e operacionalização deste modelo de comercialização no país é também crescente há anos. Como exemplo, a atual maior empresa varejista *online* da América Latina, Mercado Livre, investiu R\$ 17 bilhões no Brasil em 2022.

Dessa forma, as empresas que atuam em *e-commerce* direcionam suas políticas estratégicas ao ganho de participação no mercado (*market share*) e, para isso, buscam sempre oferecer diversidade de produtos conjugada aos menores preços e à maior velocidade na entrega. Esses são os principais fatores que determinam o resultado da disputa entre empresas pelos consumidores (CNNBRASIL, 2021).

Por sua vez, tais fatores elevam a complexidade dos processos de tomada de decisão inerentes à definição das políticas estratégicas, táticas e operacionais das empresas atuantes na área. Diversidade de portfólio de produtos implica diversidade de tipos de armazéns, pois, para cada tipo de mercadoria, deve existir um centro de distribuição

(CD) com características específicas. Por outro lado, atendimento a prazos de entregas e a operação a preços competitivos impõem a necessidade da adoção de estratégias inteligentes para a definição da localização da armazenagem (CHAKRABORTY, RAY E DAN (2013)).

Não obstante, a complexidade do problema é ainda exacerbada por outros aspectos inerentes ao modelo de comércio eletrônico que, no particular caso do mercado de varejo de alimentos, é esperado haver um aumento ainda mais expressivo da demanda via *e-commerce* (CNNBRASIL, 2021). Um dos motivos para tanto é a recorrência do público consumidor, ou seja, pessoas que compram alimentos através do *e-commerce* tendem a, e em poucos dias, voltar a comprar alimentos pela Internet (ZHANG, XIONG, HE E QU (2017)). Essa recorrência contribui para vendas de outros produtos que não são alimentos, visto que, quanto mais pessoas entram com maior frequência na plataforma, maior a probabilidade de vendas do portfólio.

Este estudo foca o setor de alimentos, o qual ainda deve ser categorizado em congelados, refrigerados e secos, classificação esta que depende da temperatura de armazenagem dentro do CD. Por esta razão, esse setor necessita de CDs refrigerados que operem sob diferentes temperaturas, implicando, assim, maiores custos de investimentos em construção e, também, maiores custos operacionais.

Neste sentido, o emprego de modelos matemáticos de otimização para prover suporte à tomada de decisão sobre a localização ótima de novos CDs de alimentos perecíveis (refrigerados, congelados e secos) considerando, também, a otimização do tamanho da infraestrutura para atendimento à demanda prevista e a otimização dos recursos necessários para o transporte das mercadorias emerge como uma alternativa interessante para empresas de *e-commerce* envolvidas com análises de investimentos visando ampliação da sua atuação no mercado. De fato, como ressaltam ZHANG, XIONG, HE E QU (2017), otimizar variáveis de negócio relacionadas a mercado e demanda, custos logísticos e de armazenagem são importantes para tomadas de decisões mais assertivas. Endereçado ao tratamento deste complexo problema de pesquisa operacional, e considerando o estado-da-arte das técnicas e tecnologias computacionais de apoio à tomada de decisão, este artigo propõe o emprego de técnicas de programação matemática para a produção de uma metodologia hábil a prover respostas ótimas às decisões que tipicamente estão envolvidas em projetos de investimentos em infraestrutura dedicados à ampliação da logística de distribuição de empresas cujo modelo de negócio esteja alicerçado no *e-commerce*.

2 Descrição do problema

No âmbito deste estudo, o ponto de partida da cadeia logística em discussão é o CD, que é o local onde há toda infraestrutura necessária para armazenar o estoque de alimentos frescos que deve ser distribuído. A operação dos CDs deve observar as seguintes regras de negócio:

- Cada novo CD a ser construído deverá atender a demanda completa de uma ou mais localidades. Neste estudo em particular, as localidades serão representadas por bairros de um mesmo município;
- Há um limite superior para o número de novos CDs que podem ser construídos visando ao atendimento pleno da demanda de todos os bairros;
- Um mesmo bairro não poderá abrigar dois CDs, e
- Cada bairro deverá ser atendido por apenas um único CD, ou seja, caso dois (ou mais) novos CDs venham a ser criados, apenas um deles poderá atender a demanda de um dado bairro.

As regras de negócio relacionadas aos CDs ainda consideram que essas estruturas prediais poderão ser compradas ou alugadas, com seu tamanho dependendo da demanda a ser por ele atendida.

A expedição de produtos a partir de um CD contempla duas possibilidades de transporte:

- Entrega do produto do CD direto ao consumidor utilizando veículos de distribuição, que são veículos menores (e.g., veículos do tipo “Fiorino” ou “van”). Essa operação é chamada de D2C (*direct to consumer*), e
- Transferência dos alimentos do CD para uma estrutura de transbordo (ponto de *crossdocking* (CR)). Um CR pode existir ou não, sendo esta uma decisão estratégica a ser tomada. Tal suprimento será realizado com veículos de transferência, que são veículos maiores como, por exemplo, carretas. A partir desta estrutura de transbordo, os produtos são transferidos para diversos veículos menores, Fiorinos ou vans, que serão utilizados para distribuição final aos consumidores.

Os veículos de transferência do CD para a estrutura de transbordo, comumente são denominados veículos MM (*middle-mile*), e os veículos normalmente menores que chegam até o comprador comumente são denominados veículos de última milha, ou seja, veículos LM (*last-mile*), terminologias internacionais, que também são usualmente adotadas no Brasil. Veículos LM poderão sair diretamente do CD e também dos CRs. Os diferentes veículos empregados para o transporte de mercadorias estão ilustrados na **FIGURA 1**.

Figura 1. Veículos utilizados para transferência de mercadorias. (a) carreta empregada para o transbordo de produtos entre os CDs e CRs; (b-c) veículos utilizados para distribuição última milha (veículos tipo Fiorino ou van), ou seja, para atendimento ao consumidor final.



(a)



(b)



(c)

Fonte: elaborado pelos autores

Caso a decisão estratégica indique a construção de um CR, sua operação deverá satisfazer ao seguinte conjunto de regras de negócio:

- Um mesmo CR poderá atender à demanda de mais de um bairro, porém um mesmo bairro não poderá ser atendido por dois (ou mais) CRs;
- Cada CR será atendido por um único CD;
- Caso a demanda de um bairro seja atendida por um CR, esse mesmo bairro não poderá ser atendido diretamente pelo CD. Ou seja, toda demanda desse determinado bairro será atendida unicamente por um CR;
- Não haverá estoque de alimentos nos CRs, ou seja, serão estruturas apenas para transbordo de alimentos, e

- Há um limite superior para o número de CRs que poderão ser construídos. Neste sentido, a premissa considerada é de que tal limite corresponda ao dobro do limite superior estabelecido para o número de novos CDs.
- Um mesmo bairro não poderá abrigar mais de um CR, tampouco um CR e um CD. Dessa forma, o bairro onde estará abrigado um CD necessariamente será diferente de um bairro onde estará abrigado um CR;
- Cada bairro poderá ser atendido por apenas um CD quando houver entregas diretamente do CD para o consumidor ou um CR quando houver pontos de transbordos. Não necessariamente é obrigatória a demanda passar por um CR, poderá ser feita operação D2C (*direct to consumer*);

Especificamente no problema em estudo, o transporte de produtos deve também satisfazer ao conjunto complementar de regras de negócio:

1- A capacidade máxima dos veículos *last-mile* são:

- a. Fiorinos: 10 pedidos, e
- a. Vans: 30 pedidos.

Esses dois tipos de veículos estarão disponíveis nos CDs e nos CRs. Não há limite máximo de disponibilidade destes veículos, ou seja, assume-se que a quantidade disponível de Fiorinos e Vans é irrestrita. Custos de transporte de cada tipo de veículo:

- a. Fiorino: R\$ 2,70/km, e
- a. Vans: R\$ 3,00/km.

2- A capacidade dos veículos de transferências (carretas) é de 300 pedidos. Neste caso, o valor de transferência de cada pedido é fixo em R\$ 8,00 por pedido e independe da distância percorrida pela carreta. Isso se deve ao fato de que a transferência é feita por carretas que normalmente percorrerão poucos km e que, portanto, o tempo parado para carga e descarga é muito superior ao tempo dispendido no transporte.

Caso seja utilizada estrutura de transbordo, é necessário um galpão logístico para essa operação. Por hipótese, neste caso há apenas a possibilidade de locação, com valor fixo de R\$ 30.000 por mês independentemente do tamanho da estrutura.

Tendo como função objetivo minimizar o custo logístico total para atendimento exato da demanda prevista, o modelo de otimização contém as seguintes variáveis de decisão:

1. Quantidade e localização dos CDs;
2. Quantidade e localização dos CRs;
3. Modelo de negociação para implantação de cada CD, qual seja, locação ou aquisição da estrutura, e
4. Seleção do tipo de veículo LM para distribuição final (Van ou Fiorino).

Tais decisões impactarão a composição do custo total da operação logística, que, conforme mostra a experiência acumulada, é fortemente dependente dos custos de transporte. No tocante a isso, graus de liberdade relevantes do problema em questão são as decisões relacionadas à opção de se utilizar uma estrutura de transbordo (transporte de transferência + transporte de distribuição + custo de locação do galpão logístico para transbordo) ou de empregar uma estratégia que desconsidere operações de transbordo, de modo a atender a demanda prevista diretamente a partir do(s) CD(s) utilizando apenas transporte de distribuição. Essa decisão deverá considerar o objetivo de obter o menor custo possível, sendo, por hipótese, o mesmo diretamente proporcional às distâncias de percurso envolvidas no transporte.

3 Nomenclatura Empregada no Modelo Matemático

O modelo matemático proposto utiliza a nomenclatura abaixo.

Índices e conjuntos

i conjunto de bairros.

Parâmetros

BUY(i) preço do m^2 no bairro " i " para compra de imóvel (em R\$);
 RENT(i) preço do m^2 no bairro " i " para aluguel de imóvel (em R\$ por mês);
 DEM(i) demanda diária pelo produto no bairro " i ".

Variáveis Binárias

Ycd(i) valor =1 se o bairro " i " for escolhido para abrigar um CD e valor = 0 caso contrário;
 Ycross(j) valor =1 se o bairro " j " for escolhido para abrigar um ponto de *cross-docking* e valor =0 caso contrário;
 Ya(i) valor =1 se o CD baseado no bairro " i " utilizara imóvel alugado e valor = 0 caso contrário;

$Y_c(i)$	valor =1 se o CD baseado no bairro “i” utilizara imóvel comprado e valor = 0 caso contrário;
$Y_{ik}(i,k)$	valor =1 se o CD baseado no bairro “i” for designado para atender a demanda do bairro “k” e valor =0 caso contrário;
$Y_{ij}(i,j)$	valor =1 se o CD baseado no bairro “i” for designado para suprir o <i>crossdocking</i> do bairro “j” e valor =0 caso contrário;
$Y_{jk}(j,k)$	valor =1 se o <i>crossdocking</i> baseado no bairro “j” for designado para atender a demanda do bairro “k” e valor =0 caso contrário.

Variáveis Positivas

$ta(i)$	tamanho em m ² do CD alugado baseado no bairro “i”;
$tc(i)$	tamanho em m ² do CD comprado baseado no bairro “i”;
$ca(i)$	custo de aluguel em R\$ para instalar o CD no bairro “i” (10 anos de aluguel) (R\$);
$cc(i)$	custo de compra de um imóvel para instalar o CD no bairro “i” (R\$);
ct	custo total de transporte (CD>>Cross + Cross>>Cliente + CD>>Cliente) (R\$);
ca_cross	custo total de aluguel gasto com galpões de <i>crossdocking</i> (R\$);
$fc(i,j)$	quantidade de produtos transferida do CD localizado no bairro “i” para o <i>crossdocking</i> localizado no bairro “j” (total ao longo do horizonte de planejamento);
$ff_cd(i,k)$	quantidade de produtos transferida do CD localizado no bairro “i” para o cliente localizado no bairro “k” por meio de Fiorino (total ao longo do horizonte de planejamento);
$fv_cd(i,k)$	quantidade de produtos transferida do CD localizado no bairro “i” para o cliente localizado no bairro “k” por meio de Van (total ao longo do horizonte de planejamento);
$ff_cr(j,k)$	quantidade de produtos transferida do <i>crossdocking</i> localizado no bairro “j” para o cliente localizado no bairro “k” por meio de Fiorino (total ao longo do horizonte de planejamento);
$fv_cr(j,k)$	quantidade de produtos transferida do <i>crossdocking</i> localizado no bairro “j” para o cliente localizado no bairro “k” por meio de Van (total ao longo do horizonte de planejamento);
ct_cross	custo de transporte entre pontos de <i>crossdocking</i> e clientes (fiorino + van) (em R\$) (total ao longo do horizonte de planejamento);
ct_cd	custo de transporte entre CD e clientes (fiorino + van) (em R\$) (total ao longo do horizonte de planejamento);
ct_cd_cross	custo de transporte entre CD(s) e pontos de <i>crossdocking</i> (em R\$) (total ao longo do horizonte de planejamento);

ct_cd_cliente custo de transporte entre CD(s) e clientes (em R\$) (total ao longo do horizonte de planejamento).

Constantes

HD	horizonte de planejamento em dias (10 anos x 365 dias);
HM	horizonte de planejamento em meses (10 anos x 12 meses);
AP	área m ² necessária para estocar uma unidade do produto no CD;
BigM	constante BigM para modelagem do tamanho do CD;
CAP_Fiorino	capacidade do Fiorino (número de produtos);
CAP_Van	capacidade da Van (número de produtos);
C_car	custo de transporte por carreta (R\$ por produto);
C_Fiorino	custo de transporte do Fiorino (R\$ por km);
C_Van	custo de transporte da Van (R\$ por km);
C_ALUG_CROSS	custo de locação para galpão <i>crossdocking</i> (R\$ por mês).
NMCDS	limite superior para a quantidade de novos CDs que poderão ser construídos.

4 Modelo matemático

Nesta seção, o modelo matemático proposto é apresentado.

A função objetivo é minimizar o custo logístico total, considerando os custos de compra ou locação do CD, custos totais de transporte (custo de transporte de transferência entre o CD e pontos de transbordos CR e custo de transporte final de até os clientes) e custos de locação do(s) ponto(s) de transbordo(s) CR, sempre atendendo toda demanda existente.

Matematicamente, a função objetivo é definida por (4.1 a):

Minimizar:

CUSTO = *custo de transporte total + custo de compra do CD no bairro “i” considerando o tamanho que o CD deverá ter para atender a demanda + custo de aluguel do CD no bairro “i” considerando o tamanho que o CD deverá ter para atender a demanda + custo total de aluguel dos galpões CR*

$$CUSTO = z = \sum_i (cc_i + ca_i) + ct + ca_cross \quad (4.1a)$$

Para atender a uma determinada demanda em uma região, cada bairro “i” poderá abrigar, no máximo, NMCDS novos CDs. Isto é imposto pelas restrições (4.2 a). Importante observar que a própria variável binária $Ycd(i)$ também atua como a restrição no sentido de que, em cada bairro “i”, o número de CDs implantados seja um número inteiro.

$$\sum_i Ycd_i \leq NMCDS \quad (4.2 a)$$

Poderão existir no máximo quatro CRs conforme estabelecido em (4.2 b).

$$\sum_j Ycross_j \leq 2 * NMCDS \quad (4.2 b)$$

Por outro lado, se em um determinado bairro “i” deve existir um novo CD, essa nova estrutura será um imóvel alugado ou comprado, conforme imposto em (4.2 c).

$$Ya_i + Yc_i = Ycd_i, \forall i \quad (4.2 c)$$

O custo de locação do CR no bairro “j” em que a estrutura será instalada está computado em (4.2 d). Aqui, considera-se que o aluguel será pago mensalmente durante todo horizonte de tempo considerado, qual seja, 10 anos.

$$ca_cross = \sum_j (Ycross_j) * C_ALUG_CROSS * HM \quad (4.2 d)$$

Importante notar que, se um bairro “i” não abriga um CD, então não há fluxo de produtos do bairro “i” para qualquer outro bairro “k” e tampouco há fluxo a qualquer CR no bairro “j”. Estas condições lógicas são impostas pelas equações (4.2 e) e (4.2 f), respectivamente.

$$Yik_{i,k} \leq Ycd_i, \forall (i,k) \quad (4.2 e)$$

$$Yij_{i,j} \leq Ycd_i, \forall (i,j) \quad (4.2 f)$$

Considerando o mesmo racional mencionado anteriormente, se em um bairro “j” não há um CR, conseqüentemente não existe fluxo de produtos do CD para o bairro “j”, tampouco do bairro “j” ao bairro dos consumidores “k”, condições existentes nas equações (4.2 g) e (4.2 h).

$$Y_{ij,k} \leq Y_{cross_j}, \forall(i,j) \quad (4.2 g)$$

$$Y_{ik,j,k} \leq Y_{cross_j}, \forall(j,k) \quad (4.2 h)$$

A quantidade de produto transferida entre dois nós da rede logística poderá ser maior que zero quando for permitido haver fluxo entre estes dois nós. Essa restrição é escrita conforme apresentada nas equações (4.2 i), (4.2 j), (4.2 k), (4.2 l) e (4.2 m).

$$ff_{cd_{i,k}} \leq Y_{ik_{i,k}} * BigM, \forall(i,k) \quad (4.2 i)$$

$$fv_{cd_{i,k}} \leq Y_{ik_{i,k}} * BigM, \forall(i,k) \quad (4.2 j)$$

$$fc_{i,j} \leq Y_{ij_{i,j}} * BigM, \forall(i,j) \quad (4.2 k)$$

$$ff_{cr_{j,k}} \leq Y_{jk_{j,k}} * BigM, \forall(j,k) \quad (4.2 l)$$

$$fv_{cr_{j,k}} \leq Y_{jk_{j,k}} * BigM, \forall(j,k) \quad (4.2 m)$$

Como premissa de negócio, foi considerado que cada bairro “k” deverá ser atendido por um único CD instalado em algum bairro “i”. Esta hipótese está representada em (4.2 n).

$$\sum_i Y_{ik_{i,k}} \leq 1, \forall k \quad (4.2 n)$$

Foi considerado, cujo racional foi o mesmo usado para CDs, que cada bairro “k” deverá ser atendido por um único CR instalado em algum bairro “j” conforme estabelecido em (4.2 o).

$$\sum_j Y_{jk_{j,k}} \leq 1, \forall k \quad (4.2 o)$$

O tamanho do CD instalado no bairro “i” deverá ser projetado a partir da quantidade de produto distribuída a partir desse CD mensalmente, ou seja, será considerado como estoque de segurança o estoque equivalente a 30 dias de demandas diárias, como em (4.2 p).

$$\sum_k (ff_{cd_{i,k}} + \frac{fv_{cd_{i,k}}}{120}) = ta_i + tc_i, \forall i \quad (4.2 p)$$

A demanda de cada cliente localizado no bairro “k” deverá ser atendida por produtos recebidos de pontos de *crossdocking* CRs e, eventualmente, diretamente de um CD localizado no bairro “i”, como imposto em (4.2 q).

$$\sum_j (ff_{cr_{j,k}} + fv_{cr_{j,k}}) + \sum_i (ff_{cd_{i,k}} + fv_{cd_{i,k}}) = DEM_k * HD, \forall k \quad (4.2 q)$$

As variáveis de tamanho do CD instalado no bairro “i” deverão ser nulas caso se opte por não ter CD neste bairro, como computado em (4.2 r) e (4.2 s).

$$ta_i \leq Ya_i * BigM, \forall i \quad (4.2 r)$$

$$tc_i \leq Yc_i * BigM, \forall i \quad (4.2 s)$$

Considerando que não haverá armazenagem nos CRs, ou seja, essas estruturas servirão apenas como pontos de transbordos. Assim, todo fluxo de produtos que chega em um CR deverá ser entregue aos clientes por eles atendidos, conforme (4.2 t).

$$\sum_i fc_{i,j} = \sum_k (ff_{-cr_{j,k}} + fv_{-cr_{j,k}}), \forall j \quad (4.2 t)$$

Entre os pontos de transbordos CRs e os clientes, serão utilizados veículos Vans e Fiorinos, cujos custos de transportes entre esses pontos são computados em (4.2 u). É possível também realizar o transporte do CD para os clientes, ou seja, operação D2C utilizando também Vans e Fiorinos, cujos custos de transportes estão definidos em (4.2 v).

$$\begin{aligned} & \sum_{j,k} \left[\left(\frac{fv_{-cr_{j,k}}}{CAP_{Fiorino}} \right) * DIST_{j,k} \right] * C_{Fiorino} + \sum_{j,k} \left[\left(\frac{fv_{-cr_{j,k}}}{CAP_{Van}} \right) * DIST_{j,k} \right] * C_{Van} \\ & = ct_{cross} \end{aligned} \quad (4.2 u)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i,k} \left[\left(\frac{ff_{-cd_{i,k}}}{CAP_{Fiorino}} \right) * DIST_{i,k} \right] * C_{Fiorino} + \sum_{i,k} \left[\left(\frac{fv_{-cd_{i,k}}}{CAP_{Van}} \right) * DIST_{i,k} \right] * C_{Van} \\ & = ct_{cd} \end{aligned} \quad (4.2 v)$$

Os custos de transportes de mercadoria entre os CDs e CRs são calculados através de (4.2 w).

$$\sum_{i,j} (fc_{i,j}) * C_{car} = ct_{cd_cross} \quad (4.2 w)$$

Assim, o custo total de transporte fica quantificado por (4.2 x).

$$ct = ct_{cross} + ct_{cd_cross} \quad (4.2 x)$$

O custo de aluguel do CD depende do bairro “i” em que o CD será instalado e depende também do tamanho que o CD deverá ter para atender a demanda pelo mesmo. Importante destacar que o aluguel será pago mensalmente o período de planejamento. Esse custo de aluguel está computado em (4.2 y).

$$ca_i = RENT_i * HM * ta_i, \forall i \quad (4.2 y)$$

De forma semelhante à equação anterior, custo de compra do CD depende do bairro “i” em que o empreendimento será instalado e também do tamanho que o mesmo deverá ter para atender a demanda, conforme modelado em (4.2 z).

$$cc_i = BUY_i * tc_i, \quad \forall i \quad (4.2 z)$$

5 Resultados obtidos no problema

A solução de uma instância do problema é apresentada nesta seção. Neste experimento computacional, foi considerado um horizonte de planejamento de dez anos. Foi assumido que, no máximo, dois novos CDs podem ser construídos para viabilizar toda a operação logística. Um único produto foi considerado assumindo-se, ainda, que o espaço requerido para sua armazenagem no CD é de 1 m² por unidade do produto.

A parametrização da instância é apresentada a seguir. A TABELA 5.1 tabula as distâncias entre os quinze bairros modelados neste estudo. Ressalte-se que estas distâncias são, via de regra, constantes. Contudo, elas podem sofrer alterações quando há obras, desvios ou eventos similares que, por modificar a extensão dos percursos a serem realizados, obrigam o replanejamento das operações diárias.

Constantes

HD	horizonte de planejamento em dias (10 anos x 365 dias)	=3650
HM	horizonte de planejamento em meses (10 anos x 12 meses)	=120
AP	área, em m ² , necessária para estocar uma unidade do produto no CD	=1
BigM	constante BigM para modelagem do tamanho do CD (m ²)	=1012
CAP_Fiorino	capacidade do Fiorino (número de produtos)	=10
CAP_Van	capacidade da Van (número de produtos)	=30
C_car	custo de transporte por carreta (R\$ por ordem)	=8
C_Fiorino	custo de transporte do Fiorino (R\$ por km)	=2.7
C_Van	custo de transporte da Van (R\$ por km)	=3
C_ALUG_CROSS	custo de locação para galpão <i>crossdocking</i> (R\$ por mês)	=30000

Tabela 5.1 Distância (em km) entre os centros dos bairros “i” e “j” (parâmetro DIST(i,j)).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	5	20	12	38	40	50	60	70	80	90	100	200	300	400
2	5	0	6	8	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
3	20	6	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
4	12	8	20	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
5	38	15	40	5	0	30	60	80	100	120	140	160	180	200	220
6	40	30	60	10	30	0	5	10	15	20	40	55	70	85	100
7	50	45	80	15	60	5	0	1	2	3	4	5	6	7	8
8	60	60	100	20	80	10	1	0	2	4	8	10	12	14	16
9	70	75	120	25	100	15	2	2	0	90	105	120	135	150	165
10	80	90	140	30	120	20	3	4	90	0	160	180	200	220	240
11	90	105	160	35	140	40	4	8	105	160	0	40	45	50	55
12	100	120	180	40	160	55	5	10	120	180	40	0	180	200	220
13	200	135	200	45	180	70	6	12	135	200	45	180	0	85	100
14	300	150	220	50	200	85	7	14	150	220	50	200	85	0	8
15	400	165	140	55	220	100	8	16	165	240	55	220	100	8	0

Fonte: autor

Já a TABELA 5.2 apresenta os valores venais, em R\$ por m², para aquisição dos imóveis nos quinze bairros considerados (parâmetros BUY(i)), bem como os respectivos valores de locação, em R\$ por m² (parâmetro RENT(i)). Ainda são apresentados nesta tabela os valores de demanda diária por produtos em cada um dos bairros, demanda esta que deve ser exatamente atendida (DEM(i)).

Tabela 5.2 Valores venais, de locação e demanda diária prevista por produtos para cada bairro.

	Valor venal (R\$/m ²)	Valor de locação (R\$/m ²)	Demanda prevista (produtos/dia)
Bairro	(Parâmetro BUY(i))	(Parâmetro RENT(i))	(Parâmetro DEM(i))
1	2000	20	120
2	500	7	207
3	1000	10	100
4	11000	110	500
5	7000	33	330
6	2600	12	3200
7	5900	19	1900
8	3500	27	270
9	4000	41	41
10	7000	23	835
11	2100	5	455
12	300	2	200
13	8000	66	660
14	6300	50	90
15	4000	48	48

Fonte: autor

O modelo MILP foi resolvido com o emprego do método *Branch and Bound* baseado em LP implementado no solver CPLEX (IBM, 2017). O modelo contém 2.183 equações e 1.926 variáveis das quais 735 são variáveis binárias. O modelo de otimização foi resolvido em 0,328 segundos em um computador pessoal com processador Intel(R) Celeron(R) CPU B815 1.60GHz e 6 GB de memória RAM, produzindo, como principais decisões estratégicas, as relacionadas abaixo:

- A implantação de dois bairros abrigar centros de distribuição, quais sejam, bairros 2 e 12. Especificamente, a implantação do CD no bairro 2 deve se dar pela aquisição de um imóvel com a dimensão de $1,3557 \times 105 \text{ m}^2$, enquanto que no bairro 12 a implantação do CD deve ser através de locação de um imóvel com dimensão de $1,3684 \times 105 \text{ m}^2$, e
- A implantação de um único CR no bairro 7.
- Para operacionalizar a distribuição dos produtos, tanto dos CDs diretamente para clientes (operação D2C) assim como dos CRs para os clientes, devem ser utilizadas exclusivamente vans.

6 Conclusões

Este estudo foi endereçado à análise de um problema de otimização logística do transporte e distribuição de produtos comercializados através do modelo de e-commerce. Objetivando reduzir a discrepância entre o modelo matemático e o problema real, foi priorizada a implementação de modelagem detalhada enfocando, porém não se restringindo, à:

- Representação do custo de transporte de transferência entre CDs e CRs com objetivo de reduzir custos de última milha, e
- Representação de diferentes tipos de veículos de última milha (vans e Fiorinos) com valores de transportes diferentes de modo que se produzam orientações otimizadas sobre quais modais de veículos devem ser utilizados de modo que a operação seja realizada ao menor custo possível assegurando-se atendimento a toda demanda prevista.

A abordagem proposta produz orientações preciosas para uma operação logística com menor custo possível, aqui compreendidas decisões de natureza econômica sobre a

localização ótima de centros de distribuição e de pontos de transbordos para diferentes cenários de custos e de demandas ao longo do horizonte de planejamento. Especificamente, o sistema de modelagem GAMS foi considerado para a implementação do modelo e do método de solução, o qual consistiu do método *Branch and Bound* baseado em programação linear (solver CPLEX).

Os resultados produzidos demonstram que, além de suportar o processo de tomada de decisões relativas ao planejamento de cenários futuros (auxiliando, assim, os gestores na execução de suas atividades de otimização estratégica), a metodologia também pode representar a base para a derivação de outras soluções, como ferramentas para análise tática ou operacional do negócio. Claramente, para este fim seriam necessários maiores investimentos em modelagem, a fim de capturar aspectos salientes do problema na escala de curto ou médio-prazos.

Com o modelo proposto também é possível obter, rapidamente, orientações estratégicas em função de mudanças nos cenários macroeconômicos bem como nas condições de contorno que definem o problema. Outras análises também relevantes para a realidade do sistema modelado, tais como aquelas considerando diferentes valores de custo por metro quadrado dos imóveis em cada bairro e variações na demanda de cada bairro, podem ser executadas de modo a se obter preciosas orientações estratégicas que podem apoiar decisões em outras camadas de negócio, seja no plano tático ou operacional para diversos cenários de operação logística.

Contudo, o presente estudo possui limitações diversas. Dentre elas, cita-se o caráter determinístico da abordagem adotada que, inevitavelmente, dificulta a análise de eventos estocásticos que são inerentes ao problema endereçado. Por exemplo, sabe-se que demandas de alimentos no *e-commerce* são sazonais, variam diariamente durante a semana e ficam sujeitas ao impacto de outros fatores, como feriados. Ou seja, há incertezas relevantes associadas ao sistema real e esses fatores não estão sendo considerados no modelo estudado. Neste sentido, a adoção de parâmetros constantes para representar grandezas de natureza estocástica implica uma simplificação do problema logístico real de modo que o analista de otimização deve sempre analisar cuidadosamente a resposta obtida, por meio de análises de sensibilidade com relação à parametrização da instância base considerada.

Ainda assim, é possível concluir que o modelo proposto pode, potencialmente, ser de grande relevância para apoio à tomada de decisão em operações logísticas de sistemas reais de distribuição de alimentos no *e-commerce*.

Por fim, ressalte-se que extensões desta pesquisa são inúmeras. Sofisticação da modelagem matemática para representar comportamentos não lineares do sistema constitui uma extensão natural deste desenvolvimento. Isso poderia, por exemplo, ser o caso da operação do sistema considerando limites superiores para o tempo de entrega dos produtos. Aqui, haveria um compromisso ótimo a ser explorado entre os custos dos recursos necessários (carretas, vans e Fiorinos, bem como outros recursos tampouco modelados neste trabalho, como recursos humanos) e os benefícios auferidos com o pleno atendimento às novas restrições. Para tanto, ganhos de escala (e.g., na contratação de recursos) potencialmente existem e, neste caso, também deverão ser considerados. Considerando a elevada dimensão dos problemas reais quando analisados sob a ótica integrada do planejamento e da operação logística, outra linha de desenvolvimento promissora é a adoção de estruturas de solução hierarquizadas. Aqui, a solução sucessiva de problemas específicos endereçando aspectos salientes de cada camada de negócio (planejamento estratégico/planejamento tático/programação operacional) emerge como uma alternativa interessante para a produção de soluções de boa qualidade em tempos computacionais aceitáveis.

7 Referências

CHAKRABORTY, Romita; RAY, Ankita; DAN, Pranab K. **Multi criteria decision making methods for location selection of distribution centers**. International Journal Of Industrial Engineering Computations, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 491-504, 1 out. 2013. Growing Science. <http://dx.doi.org/10.5267/j.ijiec.2013.06.006>.

CNNBRASIL (2021). MAGALU, B2W, **MERCADO LIVRE: QUEM VAI VENCER A CORRIDA DA ENTREGA MAIS RÁPIDA**. São Paulo, 04 fev. 2021. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/business/magalu-b2w-mercado-livre-quem-vai-vencer-a-corrida-da-entrega-mais-rapida/>. Acesso em: 21 ago. 2021.

E-COMMERCEBRASIL (2021). **E-COMMERCE BRASILEIRO CRESCE 73,88% EM 2020, REVELA ÍNDICE MCC-ENET**. São Paulo, 02 fev. 2021. Disponível em: <https://www.ecommercebrasil.com.br/noticias/e-commerce-brasileiro-cresce-dezembro/>. Acesso em: 21 ago. 2021.

EXAME (2021). **MAGAZINE Luiza entregará alimentos da BRF em até um dia útil**. 2021. Disponível em: <https://exame-com.cdn.ampproject.org/c/s/exame.com/negocios/magazine-luiza-entregara-alimentos-da-brf-em-ate-um-dia-util/amp/>. Acesso em: 04 set. 2021.

IBM (2017) CPLEX **User's Manual**. IBM Corporation. Available at: www.ibm.com/

O GLOBO (2021). **DISPUTA PARA SER 'O MAIS RÁPIDO' AINDA NÃO ACABOU**. São Paulo, 30 jul. 2021. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2021/07/30/disputa-para-ser-o-mais-rapido-ainda-nao-acabou.ghtml>. Acesso em: 21 ago. 2021.

ZHANG, Hao; XIONG, Ying; HE, Mingke; QU, Chongchong. **Location Model for Distribution Centers for Fulfilling Electronic Orders of Fresh Foods under Uncertain Demand**. Scientific Programming, [S.L.], v. 2017, p. 1-13, 2017. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2017/3423562>.

DOI: 10.29327/2152495.7.22-3

