

ROTEAMENTO DO SISTEMA DE TRANSPORTE INTERMODAL DE CARGAS

André Kenji Ikeuti

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
Rua Marquês de São Vicente, 225 - Gávea, Rio de Janeiro / RJ
andreikeuti@aluno.puc-rio.br

Rafael Martinelli

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)
Rua Marquês de São Vicente, 225 - Gávea, Rio de Janeiro / RJ
martinelli@puc-rio.br

RESUMO

Este artigo busca solucionar um problema de roteamento aeroterrestre de transporte de cargas, com linhas aéreas predeterminadas e frotas próprias e heterogêneas. Para tanto, são incluídos a um modelo tradicional do problema de roteamento de veículos arcos que representam as possíveis linhas aéreas. O modelo é aplicado em um órgão governamental que possui 25 locais de entrega. Primeiramente é realizado um teste com preenchimento total das demandas de todos os locais para fins de validação do modelo e, em seguida, é aplicado no planejamento real de rotas de três períodos distintos. Em comparação com as rotas efetivamente realizadas, o modelo traz redução de 7% a 55% dos custos com transportes.

PALAVRAS CHAVE. Roteamento de veículos, Intermodal, Programação inteira.

Tópicos. L&T – Logística e Transportes, PM – Programação Matemática

ABSTRACT

This article seeks to solve the problem of air-land cargo routing, with predetermined airlines and their own heterogeneous fleets. To this end, arcs representing possible airlines are included in a traditional model of the vehicle routing problem. The model is applied in a government agency that has 25 delivery locations. First, we performed a test with total fulfillment of the demands of all sites for model validation purposes and then we applied to the actual route planning of three distinct periods. In comparison to the routes actually performed, the model reduces transport costs by 7% to 55%.

KEYWORDS. Vehicle routing, Intermodal, Integer Programming.

Paper topics. L&T – Logistic & Transport, MP - Mathematical Programming

1. Introdução

O transporte internacional de cargas via modal aéreo está em constante crescimento nas últimas décadas [Huang et al., 2020]. Esse protagonismo surgiu a partir do momento em que as empresas passaram a atuar no mercado global, em consonância com a modernização da gestão das operações que tornou favorável a relação entre custo e tempo do transporte aéreo [Feng et al., 2015; Archetti e Peirano, 2020; Huang et al., 2020]. Isso possibilitou que as transportadoras passassem a oferecer serviços com altos valores agregados, como a entrega porta-a-porta [Huang et al., 2020]. Contudo, devido à complexidade das operações envolvidas no roteamento intermodal, a maioria dos problemas do mundo real ainda não foi satisfatoriamente resolvida [Feng et al., 2015].

O serviço de porta-a-porta consiste na utilização de caminhões e aeronaves para a realização de entregas de mercadorias de um depósito para o cliente. De maneira geral, o produto é carregado em um caminhão até o aeroporto de origem, transportado por aeronave até o aeroporto de destino e, por fim, destinado ao cliente por outro caminhão. Nessas operações, o desafio é tomar as decisões de transporte para realizar as entregas com o menor custo possível, dentro de um limite de tempo [Huang et al., 2020].

O problema abordado neste artigo é o roteamento de um serviço de entrega porta-a-porta que possui um depósito único e diversos clientes. Para realizar os transportes, o despachante possui frota própria de caminhões, localizadas no depósito, e de aeronaves que seguem rotas previamente planejadas. Enquanto a frota terrestre inicia seu trajeto do depósito e, obrigatoriamente, deve retornar a ele após a realização da última entrega; as aeronaves iniciam e encerram seus trajetos em aeroportos distintos. Há a possibilidade de transbordo de carga do caminhão para a aeronave, exclusivamente.

A Figura 1 ilustra as possíveis rotas de um caso fictício que possui origem no ponto 1 e necessita realizar a entrega nos pontos 2 a 8. A rota azul representa o caminhão que percorre os clientes 3, 4, 5, 6 e retorna ao depósito. A rota verde ilustra o trecho aéreo que inicia ponto 6 e atende os pontos 7 e 8, ao passo que a rota laranja atende à demanda do ponto 2, apenas. Os arcos com cores mais claras (vermelho e lilás) retratam rotas aéreas que estavam disponíveis para realizar o transporte, mas não foram utilizadas.

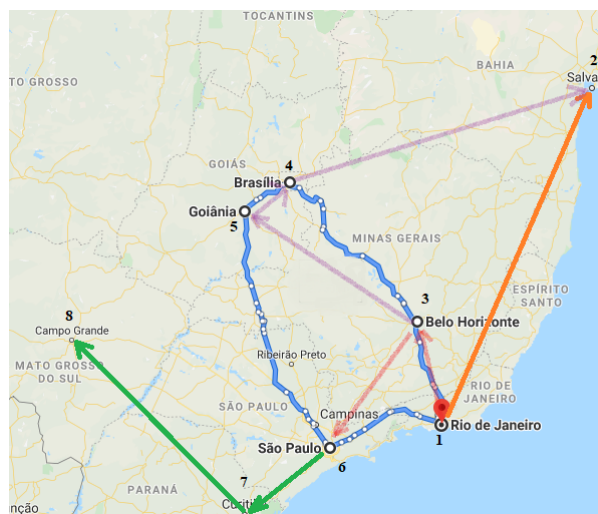


Figura 1: Exemplo Fictício.

O problema apresentado, nomeado como *heterogeneous air-land cargo routing problem with predetermined airlines* (HALRPPA) é uma extensão do clássico Problema de Roteamento de

Veículos (VRP), com a inclusão de restrições que formam as linhas aéreas predefinidas (LAP) e que permitem a realização de entregas via aeronaves, caminhões, ou com a utilização dos dois modais. O HALRPPA se diferencia do estudo atual de Huang et al. [2020] por possuir frota própria de caminhões e aeronaves, em consequência, não há a figura dos despachantes de cargas aéreas.

O VRP, introduzido inicialmente por Dantzig e Ramser [1959] em seu modelo mais simples, o VRP capacitado (CVRP), consiste na elaboração de rotas ótimas de veículos de transporte de bens de um depósito para vários clientes, em que cada automóvel está restrito a uma capacidade de carga [Laporte, 2007]. Ao longo dos anos, diversas extensões do VRP foram elaboradas para retratar as numerosas variáveis contidas nos problemas reais [Vidal et al., 2020].

Portanto, a proposta é modelar o HALRPPA e utilizar a Programação Linear Inteira Mista (MILP) para fornecer as rotas com custo mínimo e aplicá-lo em um caso real enfrentado por um órgão governamental para verificar os possíveis ganhos com a redução dos custos de transporte. Além disso, como objetivo secundário, procura-se estudar a ocasião em que a utilização do modal aéreo é mais econômico em relação ao terrestre.

Este artigo está organizado em seis seções, incluindo esta introdutória. Seção 2, o referencial teórico. Seção 3, a formulação do modelo. Seção 4, descrição do caso. Seção 5, resultados e discussões e, por fim, na Seção 6, as conclusões obtidas.

2. Referencial Teórico

O Problema do Despacho de Caminhões, que atualmente é conhecido como VRP, foi introduzido por Dantzig e Ramser [1959] como uma extensão do Problema do Caixeiro Viajante (TSP), com o acréscimo das algumas condições. Basicamente, o CVRP busca minimizar a distância total percorrida, exigindo as seguintes premissas: as rotas se iniciam e terminam no mesmo depósito; todos os locais, obrigatoriamente, devem ser visitados somente uma vez e; a demanda total da rota não pode exceder a capacidade dos veículos.

Com o passar dos anos, diversas extensões do VRP foram elaboradas para retratar as numerosas variáveis contidas nos problemas reais, como as variantes estudadas por Laporte [2009]. Dentre elas, participa do HALRPPA o problema de roteamento de veículos heterogêneos (HVRP), além do problema de roteamento de veículos com *multicommodity*.

O fluxo de *commodity* no VRP foi inicialmente examinado por Gavish e Graves [1982] para modelar o movimento dos materiais durante as rotas, tendo aplicabilidade nos casos de roteamento de múltiplas categorias de produtos [Baldacci et al., 2004]. O HALRPPA realiza o transporte de um único tipo de material, porém, a restrição de fluxo de *commodity* servirá para definir os transbordos de carga dos caminhões para as aeronaves.

Para a eliminação da formação de subciclos, Desrochers e Laporte [1991] adaptaram a restrição Miller-Tucker-Zemlin (MTZ) [Miller et al., 1960], para a aplicação no VRP com janelas de tempo. Além de cumprir seu papel principal (a eliminação de subciclos e a ordem de atendimento), o algoritmo de Desrochers e Laporte [1991] indica o limite de tempo em que a demanda é atingida, sendo fundamental para os casos em que é necessário se cumprir limites de chegada e de saída do veículo em cada ponto.

2.1. Transporte intermodal de cargas

O transporte intermodal objetiva realizar um serviço de entrega de mercadorias porta-a-porta com a realização de dois ou mais modais (aéreo, fluvial, cabotagem, ferrovia e estrada) sem interrupções [Chang, 2008]. Nesse contexto, o transporte aeroterrestre, basicamente, consiste na coleta de cargas por caminhões que as levam até o aeroporto de origem; o deslocamento do aeroporto de origem ao aeroporto de destino é realizado por aeronaves e, por fim, caminhões realizam o trecho aeroporto de destino até os clientes. O grande desafio é consolidar as demandas tanto no

aeroporto de origem, quanto no de destino para fins de beneficiar-se na economia de escala [Archetti e Peirano, 2020; Huang et al., 2020].

Além disso, Chang [2008] ressalta as seguintes dificuldades para a realização do roteamento internacional intermodal: (i) multiplicidade de objetivos (minimização de tempo e/ou custo), de acordo com a prioridade do cliente; (ii) a existência de janelas de tempo dos deslocamentos aéreos; e (iii) a variação dos custos de transporte decorrentes da economia de escala.

Contudo, este artigo busca solucionar o roteamento intermodal de órgãos que sejam detentores de frota e do planejamento de suas linhas aéreas. Consequentemente, dispensa-se a necessidade de incluir as restrições de janelas de tempo. Como não há a contratação do serviço de frete, os custos de transporte não variam em relação ao peso transportado, mas sim, à distância percorrida.

2.2. Algoritmos de solução do VRP

Segundo Laporte [2009] e Braekers et al. [2016], os melhores algoritmos de resolução seriam as heurísticas, visto a grande gama de destinos existentes na maioria dos problemas reais. Nestes casos um modelo se torna inviável pelo tempo de resolução e, levando em consideração que é desejável se obter soluções rápidas, heurísticas e metaheurísticas são os métodos mais indicados.

Em contrapartida, para Laporte e Norbert [1987], os algoritmos exatos conseguem solucionar os problemas que possuem até 30 destinos. Apesar da diversidade de restrições adicionais do HALRPPA, é esperado que o algoritmo exato resolva satisfatoriamente uma quantidade pequena de clientes (até 25 destinos). De acordo com Laporte e Norbert [1987], existem três categorias de algoritmos exatos de VRP: busca direta na árvore, programação dinâmica e a programação linear inteira.

3. Formulação Matemática

3.1. Descrição do Modelo

Seja $G = (N, A)$ um grafo completo orientado, onde $N = \{0, \dots, n\}$, sendo que o vértice 0 corresponde ao depósito e os nós em $N^+ = \{1, \dots, n\}$ correspondem aos clientes; e $A = \{(i, j) \mid i \in N \wedge j \in N \wedge i \neq j\}$ o conjunto de arcos que interligam os pontos saindo de i com destino a j . A cada cliente $j \in N^+$ é atribuído um volume Vol_j e um peso w_j que representam as características das entregas a serem realizadas.

Em relação aos veículos, define-se $K = \{1, \dots, k\}$ como o conjunto de veículos, em que a constante $a = 1$ representa todos os deslocamentos aéreos, $KT = \{2, \dots, k\}$ ilustram os caminhões. Além disso, há cargas que exigem determinadas categorias de veículos, tornando necessária a criação de restrições de elegibilidade, para tanto, definem-se os subconjuntos: $NT \subseteq N$ que representa os locais que podem ser atendidos por caminhões; $N0 \subseteq N$ e $NI \subseteq N$ que retratam os dois tipos de demandas que só podem atendidas pelas classes de veículos $K0 \subseteq KT$ e $KI \subseteq KT$, respectivamente. Um custo variável C_k , é associado a cada veículo que, ao multiplicá-lo por d_{ij} que é a distância de i para j , retornará o custo de transporte do veículo k , para ir de i para j . Cada caminhão possui um limite máximo de volume total a ser transportado CAP_k e de tempo de ciclo máximo TC . T_{ij} é o tempo de deslocamento de i para j . Finalmente, x_{ij}^k é a variável binária de decisão do veículo k deslocar-se de i para j ; f_{ij}^{kp} é a variável de fluxo de *commodity* de movimento no arco $(i, j) \in A$, no veículo k , transportando a totalidade da demanda do local $p \in N^+$; e t_{jk} é a variável inteira associada ao tempo de chegada do veículo k em j .

Já para o transporte aéreo, primeiramente será proposto o subgrafo $G' = (N', A')$ que contém apenas os arcos que fazem parte das LAP. A cada arco $(i, j) \in A'$ é associado CA_{ij} , que denomina o custo aéreo de deslocamento de i para j e uma capacidade máxima de peso WA_{ij} para o transporte de i para j . Em seguida, define-se o veículo $a \in K$, o qual será associado aos arcos de A' e representará todas as aeronaves.

3.2. Premissas

Assim como nos modelos básicos de VRP, cada cliente é atendido por exatamente um caminhão / aeronave, enquanto cada caminhão / aeronave pode servir vários clientes. Além disso, cada caminhão inicia no depósito, entrega mercadorias a um subconjunto de clientes e retorna ao depósito. Em contrapartida, as LAP são abertas, portanto, não possuem necessariamente origem e fim no depósito.

Em relação ao custo de transporte aéreo, via de regra, ao avaliar tão somente os custos do transporte, o modal aéreo é exorbitantemente mais dispendioso do que o terrestre. Contudo, as aeronaves podem reservar parte de sua capacidade máxima de carga para realizar o transporte de passageiros. Desta forma, torna-se necessário atribuir um Fator de Custo (FC) que ilustra a porcentagem de relevância do transporte de cargas em relação ao de passageiros. Assim sendo, quando o $FC = 100\%$, significa que a aeronave foi deslocada exclusivamente para realizar a entrega de carga, ou seja, não há passageiros à bordo; ao passo que $FC = 0\%$ pode-se inferir que a aeronave está com a sua capacidade quase que completamente comprometida por motivos alheios à entrega do pedido.

3.3. Formulação do Modelo

$$\min z = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \left(CA_{ij} FC x_{ij}^a + \sum_{k \in KT} C_k d_{ij} x_{ij}^k \right) \quad (1)$$

sujeito a

$$\sum_{p \in N^+} Vol_p f_{ij}^{pk} \leq CAP_k x_{ij}^k \quad \forall i, j \in NT, k \in KT \quad (2)$$

$$\sum_{p \in N^+} w_p f_{ij}^{pa} \leq W A_{ij} x_{ij}^a \quad \forall (i, j) \in A' \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in K} \left(f_{ij}^{pk} - f_{ji}^{pk} \right) = \begin{cases} -1, & \text{se } j = 0, \\ 0, & \text{c.c.}, \\ 1, & \text{se } j = p. \end{cases} \quad \forall j \in N, p \in N^+ \quad (4)$$

$$\sum_{i \in NT} \left(x_{ij}^k - x_{ji}^k \right) = 0 \quad \forall j \in NT, k \in KT \quad (5)$$

$$\sum_{j \in NT} x_{0j}^k \leq 1 \quad \forall k \in KT \quad (6)$$

$$t_{jk} \geq t_{ik} + T_{ij} - TC(1 - x_{ij}^k) \quad \forall i, j \in NT, k \in KT \quad (7)$$

$$\sum_{j \in NT} \sum_{k \in KI} \left(x_{ij}^k + x_{ji}^k \right) = 0 \quad \forall i \in N0 \quad (8)$$

$$\sum_{j \in NT} \sum_{k \in K0} \left(x_{ij}^k + x_{ji}^k \right) = 0 \quad \forall i \in NI \quad (9)$$

$$0 \leq t_{jk} \leq TC \quad \forall i \in N, k \in KT \quad (10)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N, k \in K \quad (11)$$

$$f_{ij}^{pk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N, p \in N^+, k \in K \quad (12)$$

A Função Objetivo (1) minimiza os custos de transporte aéreos e terrestres. As Restrições (2) e (3) são, respectivamente, as restrições de capacidade terrestre e aérea. As Restrições de (4) a (6) são as restrições de conservação do fluxo. A Restrição (4) conserva o fluxo do pedido p entre i e j , permitindo o transbordo entre os veículos; a Restrição (5) conserva o fluxo de veículos nas rotas terrestres; e a Restrição (6) impede que um caminhão realize mais de uma rota. A Restrição (7) é a MTZ de impedimento da formação de subciclos. As Restrições (8) e (9) definem a elegibilidade entre as cargas e veículos terrestres. As Restrições (10) associam o t_{jk} ao tempo de ciclo, sendo que, as Restrições (7) e (10), conjuntamente, limitam o TC nas rotas terrestres. Por fim, as Restrições (11) e (12) aplicam a característica binária de x_{ij}^k e f_{ij}^{pk} .

4. Descrição do Caso

O órgão em estudo, apelidado de Centro Logístico (CL), possui como missão institucional realizar o transporte de cargas para todo o território nacional, tendo à sua disposição uma frota própria de caminhões e de aeronaves. O CL possui um depósito central e 25 clientes espalhados pelo território nacional.

Existem 10 LAP onde as aeronaves sobrevoam quinzenalmente. Nessas rotas, estão incluídos os locais remotos (pontos 23, 24, 25 e 26). A Figura 2 ilustra o mapa completo de LAP que o órgão possui. Sempre que há a demanda que poderia ser atendida por uma aeronave, o CL procura atendê-la, caso não ultrapasse o limite de peso da aeronave. Alternativamente, para o atendimento emergencial ou estratégico, o CL utiliza seus caminhões para o transporte de cargas. A frota de caminhões e aeronaves são heterogêneas, portanto, possuem capacidades e custos distintos. Inclusive, um dos veículos possui a categoria de caminhão prancha que é destinada unicamente para o transporte de cargas de grande porte e indivisíveis, ou seja, não podem ser fracionadas em volumes menores, como exemplo: máquinas, automóveis, aeronaves, dragas, etc.

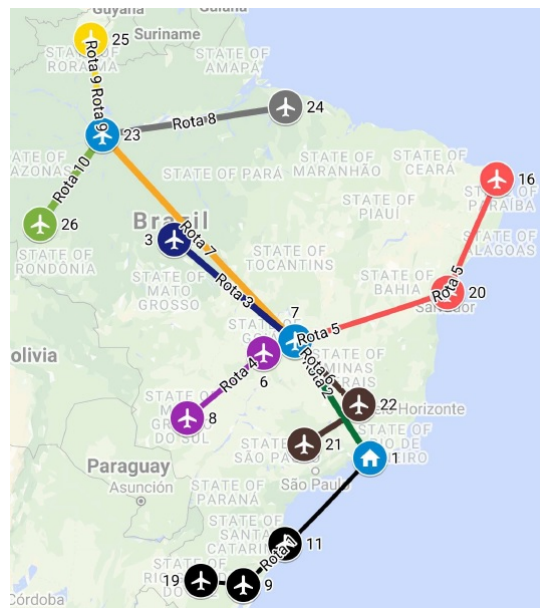


Figura 2: Rotas Aéreas Predefinidas.

Além disso, é importante destacar que existe a possibilidade de uma aeronave ser deslocada para cumprir um trecho que não faz parte das LAP. Essas rotas, chamadas de rotas extraordinárias (RE), não compõem o planejamento de transporte do órgão, muito em virtude de que

a informação sobre essas rotas não necessariamente chegam ao órgão no período de confecção da programação dos trajetos.

4.1. Simplificações

Algumas restrições observadas no caso não fizeram parte deste estudo para que o modelo não se tornasse demasiadamente complexo, de tal forma que a resolução não fosse obtida em tempo aceitável. A primeira simplificação é relativa ao horizonte de planejamento e o TC , pois o modelo não contempla as pausas para descanso dos motoristas. O CL possui um prazo de entrega de quinze dias, todavia, uma forma de compensar o limite de jornada de trabalho (oito horas) foi na adoção de um TC de apenas cinco dias. Essa sintetização pode ser considerada coerente, já que o prazo de entrega é reduzido na mesma proporção (um terço) em que a jornada de trabalho possui em relação à quantidade total de horas em um dia. Além disso, cabe destacar que o TC das aeronaves foram ignoradas, visto que o transporte aéreo é extremamente rápido (no máximo 4h para as distâncias mais longas para viagens nacionais), sendo irrelevante para o cômputo do total dos TC .

A segunda é relacionada às restrições de capacidade. O limite de peso máximo dos caminhões possuem baixa probabilidade de ultrapassagem, portanto, a restrição de capacidade dos veículos terrestres se resume exclusivamente ao volume das cargas. No caso das aeronaves a situação é inversa, já que o volume não é um fator limitante como ocorre com o peso. Contudo, há a possibilidade das dimensões das cargas ultrapassarem a largura do caminhão ou da porta do avião, porém essas restrições de dimensões não foram contempladas no modelo. Ainda comentando sobre as cargas aéreas, existem categorias de materiais cujo transporte aéreo é vedado, contudo, como a regulamentação é extremamente complexa, haveria a necessidade de criação de uma série de restrições que poderiam inviabilizar o modelo.

A terceira simplificação também foi feita para não inviabilizar o tempo de solução, que é a existência de demandas não apenas no depósitos, mas também em outros locais. Desta forma, haveria a necessidade de realização de entregas e coletas nos destinos (*pickup-and-delivery*).

4.2. Definição dos Custos

Os custos terrestres C_k foram considerados apenas como custos variáveis, em função da distância percorrida, que serão calculados da seguinte forma: i) afere-se o consumo de cada caminhão $cons_k$, em quilômetros por litro; ii) estima-se o preço médio do diesel v_{diesel} , em reais por litro; e iii) somam-se todos os demais custos diversos CD (que englobam a arla, manutenção, rastreadores e documentação) e divide-se pela distância percorrida, em quilômetros, de todos os caminhões. O CD utilizado neste estudo consolidou as despesas realizadas durante o ano de 2019 e, logicamente, a distância percorrida por todos os caminhões no mesmo ano. Da mesma forma, o $cons_k$ e o v_{diesel} foi aferido pelo valor médio de 2019. Pode-se resumir a fórmula do custo terrestre conforme a Equação (13).

$$C_k = \frac{v_{diesel}}{cons_k} + CD \quad (13)$$

Para as aeronaves, o CA_{ij} foi calculado da seguinte forma: i) obtém-se o custo aéreo total (CAT) através da soma dos seguintes custos: manutenção e modernização, combustíveis e lubrificantes, manutenção de simuladores e aquisição de aeronaves; ii) afere-se o custo da hora de voo (CHV) a partir da divisão do CAT pelas horas de voo (HV) que cada aeronave realizou; e iii) multiplica-se o CHV pelo tempo, em horas, de deslocamento aéreo (tA) de i para j . O CHV neste artigo contemplou os CAT e as HV relativos ao primeiro semestre de 2019. A Equação (14) ilustra o cálculo do custo aéreo.

$$CA_{ij} = \frac{CATtA_{ij}}{HV} \quad (14)$$

Conforme comentado na Seção 3.2, houve a necessidade de se deflacionar o CA_{ij} através de um FC , por conta da possibilidade de se realizar múltiplas tarefas com uma aeronave. Nesse sentido, as aeronaves que atendem o CL cumprem não apenas as atividades de transporte de carga e de passageiros, mas também, atividades de treinamento, patrulha aérea e inspeção de voo. Além disso, ressalta-se que o CL exerce um papel social preponderante em regiões remotas que não possuem acesso por veículos terrestres, realizando a entrega de alimentos, medicamentos e outros materiais para as comunidades carentes. Então, conclui-se que o transporte de cargas para o CL pode ser considerado uma atividade subsidiária na realização do planejamento das operações aéreas. Pelos motivos expostos, o FC que integrou este artigo foram definidos como 0%, 10% e 20%.

5. Resultados e Discussões

O modelo foi testado em um computador com processador Intel Core i7-8700K CPU 3.70 GHz; 64 MB de memória RAM e sistema operacional Ubuntu Linux, 64 bits, com o emprego de 1 núcleo. O *solver* de MILP utilizado foi o Gurobi 9.0.2, na linguagem Julia 1.0.5. O tempo de execução do modelo foi definido para, no máximo, 10.800 segundos (3 horas).

5.1. Velocidade e análise de viabilidade

Inicialmente, foi realizado um teste de validação do modelo por meio de um caso fictício, utilizando-se dados aleatórios com demandas em todos os 25 locais. O FC foi definido como 0% para a utilização completa das LAP. As demandas 16, 18 e 20 foram consideradas indivisíveis para fins de elegibilidade. O tempo de execução atingiu o limite, deixando um *gap* de 6,65% entre a melhor solução inteira encontrada e o limite inferior.

A Tabela 1 resume todas as rotas resultantes da otimização das demandas fictícias. Na primeira coluna (Rota) estão os pontos percorridos pelos veículos que estão na coluna seguinte (k); na terceira coluna constam as demandas transportadas pelo veículo; nas próximas duas colunas (Peso e Vol), as restrições de capacidades aérea e terrestre, respectivamente, sendo que o valor entre parênteses demonstra o limite máximo de acordo com a categoria do veículo e ; na última coluna (TC), demonstra o tempo de ciclo do veículo e , novamente, entre parênteses estão os limites do TC , que é atualizado caso o veículo esteja continuando uma rota anterior. Esta tabela demonstra que todas as restrições foram respeitadas e, portanto, o modelo é válido.

5.2. Resultados

Preliminarmente, foi realizada uma análise comparativa da otimização das rotas de transporte do órgão em três períodos não-consecutivos. Em cada um dos períodos, foram realizadas três iterações, modificando-se apenas o FC para 0, 10% e 20%.

Ressalta-se que no período 2 do realizado houve a inclusão de uma RE efetuando a rota (1,20,17,16). Já no período 3, além de uma RE cumprindo o trecho (1,12), os locais: 2, 5, 10, 13, 14, 18, 21 e 22 postergaram o recebimento para o próximo ciclo de planejamento. Além disso, excepcionalmente neste período, houve substituição da aeronave que realiza a rota 2 (1,7) para outra de maior capacidade, contudo, que possui maior custo aéreo. Em ambos os dias, foram testadas tanto as demandas com o planejamento original (sem as RE , troca de aeronave e adiamento da entrega), como também foram realizadas as iterações considerando que o órgão detivesse as informações precisas.

O tempo de resolução foi sensível sob dois aspectos: a quantidade de locais a serem atendidos e o FC . Avaliando-se o primeiro fator, a otimização foi alcançada no período 2 e no período 3 (apenas com as informações precisas), em virtude de haver, respectivamente, 11 e 13

Tabela 1: Resultados do modelo com demandas aleatórias.

Rota	k	Demandas	Peso(lim)	Vol(lim)	TC(lim)
(1,7)	1	6,7,8,17,22,24,26	2997 (3000)	-	-
(7,3)	1	3	563 (9200)	-	-
(7,6,8)	1	6,8	798 (9200)	-	-
(7,20,16)	1	20,16	927 (24163)	-	-
(1,11,9,19)	1	11,9,19	1645 (1700)	-	-
(7,22)	1	15,22	1028 (1700)	-	-
(22,21)	1	21	917 (1700)	-	-
(7,23)	1	23,24,25,26	1991 (24163)	-	-
(23,24)	1	24	111 (24163)	-	-
(23,25)	1	25	477 (24163)	-	-
(23,26)	1	26	683 (24163)	-	-
(1,18,1)	3	18	-	36,0 (118,6)	14,4 (120,0)
(1,4,7)	4	3,12,15,16,20,23,25	-	84,0 (85,0)	19,5 (120,0)
(7,12,17,1)	4	12,17	-	58,0 (85,0)	86,8 (100,5)
(1,2,14,22)	5	2,4,14,21	-	77,0 (85,0)	14,3 (120,0)
(22,15)	5	4,15	-	21,0 (85,0)	0,4 (105,4)
(15,4,1)	5	4,15	-	21,0 (85,0)	7,7 (105,3)
(1,10,13,1)	7	10,13	-	63 (63,8)	28,2 (120,0)
(1,5,1)	11	5	-	17,0 (36,6)	0,9 (120,0)

destinos. Nas demais iterações, a quantidade de locais variaram entre 19 (período 1) e 22 (período 3). Sob outra ótica, nos demais períodos houve variação dos *gaps* de 0,0% até 26,0%, conforme se alterou o *FC*. Ao se analisar apenas o período 1, o *gap* aumentou conforme foi se ampliando o *FC*. Porém, o mesmo não ocorreu no período 3 e, sendo assim, percebe-se apenas que o *FC* influencia no tempo de resolução, entretanto, não se pode concluir que há correlação entre eles.

Os custos resultantes modelo estão presentes na Tabela 2, que está dividida em duas etapas: a primeira contendo o modelo otimizado (com o planejamento original); e a última, com o modelo otimizado com as informações precisas. Em cada uma das fases foi incluído o valor da *FO* de todos os períodos, o *gap* e o tempo de resolução, para os *FC* iguais a 0, 10% e 20%.

Tabela 2: Custos resultantes do modelo e das rotas efetivamente realizadas.

Modelo Otimizado com informações do planejamento original

FC	Período 1			Período 2			Período 3		
	FO	gap	T	FO	gap	T	FO	gap	T
0%	25.378,6	0,0%	3.639	13.180,6	0,0%	4	21.924,3	24,3%	10.800
10%	36.481,4	6,5%	10.800	41.394,7	0,0%	28	69.446,4	3,5%	10.800
20%	46.809,3	26,0%	10.800	67.019,0	0,0%	28	114.783,8	4,2%	10.800

Modelo otimizado com informações precisas

FC	Período 1			Período 2			Período 3		
	FO	gap	T	FO	gap	T	FO	gap	T
0%	25.378,6	0,0%	3.639	2.145,3	0,0%	1	0,0	0,0%	1
10%	36.481,4	6,5%	10.800	41.394,7	0,0%	101	64.047,4	0,0%	64
20%	46.809,3	26,0%	10.800	67.019,0	0,0%	48	110.379,1	0,0%	594

A aferição dos ganhos com a otimização foram feitos, conforme a Equação (15), com a subtração do custo das rotas efetivamente realizadas C_R da função objetivo FO e dividí-la pelo próprio C_R .

$$Ganho = \frac{C_R - FO}{C_R} \quad (15)$$

A Tabela 3 apresenta a porcentagem de ganho do modelo em relação aos trajetos não-otimizados. Em cada um dos períodos, a primeira coluna consta o FC , a segunda refere-se ao C_R . As colunas G1 e G2 contêm, respectivamente, os ganhos percentuais entre o custo original e das FO da otimização original (FO 1) e da otimização com as informações precisas (FO 2). Destaca-se que no período 1, como não houve alterações extraordinários no planejamento original, não há a coluna para o G2. Além disso, no período 3, quando o $FC = 0$, o C_R também foi zero, sendo assim, o G1 seria $-21.924,30/0$. Por esse motivo, o G1 no período 3 é N/A (não se aplica).

A Figura 3 demonstra os resultados da Tabela 3 em um gráfico que contém um comparativo entre o C_R , FO 1 e FO 2.

Tabela 3: Ganhos do modelo em relação às rotas efetivamente realizadas.

FC	Período 1		Período 2			Período 3		
	C_R	G1	C_R	G1	G2	C_R	G1	G2
0%	29.924,3	14,0	4.831,3	-172,8	55,6	0,0	N/A	0,0
10%	40.173,2	9,2	52.603,0	21,3	21,3	79.095,7	12,2	19,0
20%	50.422,0	7,2	100.374,6	33,2	33,2	158.191,4	27,4	30,2

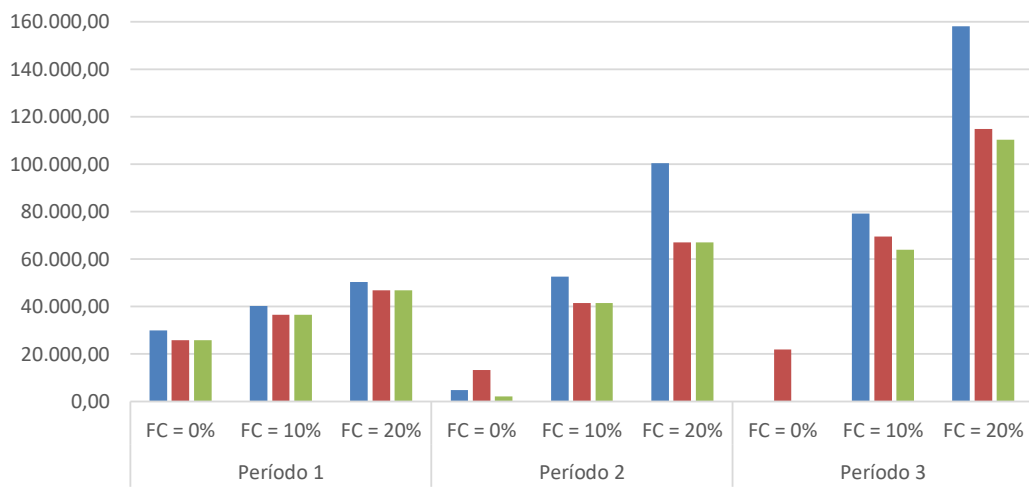


Figura 3: Representação gráfica dos custos totais das rotas.

5.3. Discussões

Os resultados indicam que o FC é preponderante na decisão de se utilizar o modal aéreo, pois a quantidade de locais atendidos por aeronaves reduzem expressivamente na medida em que o FC aumenta. Além disso, com o FC acima de 20%, apenas áreas remotas são atendidas unicamente por aeronaves. A Tabela 4 sintetiza o modal utilizado para atendimento das demandas de cada período com as rotas otimizadas (sem informações precisas). A primeira linha indica o FC aplicado. As próximas linhas, respectivamente, estão as quantidades de demandas atendidas exclusivamente por caminhão (Cam); caminhões e aeronaves com transbordo (Tr); e somente aeronaves (Aer).

Em relação aos ganhos, o modelo demonstra grandes capacidades de redução de custos (ressalta-se o ganho de 55% no período 2, com as informações precisas e $FC = 0$). Os principais

Tabela 4: Quantidade de locais atendidos por modal.

FC	Período 1			Período 2			Período 3		
	0%	10%	20%	0%	10%	20%	0%	10%	20%
Cam	7	17	19	3	7	7	7	14	15
Tr	4	2	0	0	2	2	8	5	4
Aer	8	0	0	8	2	2	7	3	3

motivos que explicam a probabilidade de economia são: i) embora o custo de transporte terrestre seja muito inferior ao aéreo, o órgão utiliza extensivamente o segundo modal; e ii) O CL emprega vários caminhões para cumprir pequenas rotas, ao invés de consolidá-las em uma única viagem. Esses dois pontos podem ser observados através da Tabela 5, a qual demonstra um comparativo entre as rotas otimizadas (R Otim) e efetivamente realizadas (R Real) do período 1, para o $FC = 10\%$.

Tabela 5: Comparação entre as rotas otimizadas e realizadas do Período 1

R Real	k	Custo	R Otim	k	Custo
(7,3)	1	5.039,5	(7,3)	1	5.039,5
(7,6,8)	1	3.490,8	(9,19)	1	321,3
(1,11,9,19)	1	1.718,5	(1,13,1)	2	3.462,83
(1,13,1)	2	3.462,8	(1,20,17,16,12,1)	10	14.265,2
(1,14,18,1)	3	2.374,7	(1,5,2,14,18)	11	1.214,3
(1,4,22,1)	6	2.483,8	(18,10,11,9,8)	11	6.495,0
(1,5,1)	8	138,0	(8,6,7,22,4,1)	11	5.683,2
(1,2,1)	9	336,6			
(1,7,20,17,16,12,1)	10	21.130,3			
Total		40.173,2	Total		36.481,4

A única ressalva a se refletir é quando ocorrem alterações no planejamento inicial, ou seja, nos casos da existência das *RE*, demandas postergadas, ou alteração de aeronaves. Nessas condições, quando o $FC = 0$, o modelo retornou valores superiores. Portanto, recomenda-se que, caso haja a possibilidade, o gestor refaça o planejamento das rotas sempre que for noticiado de novos elementos. Dessa forma, os ganhos com a otimização serão expressivamente ampliados.

Diante do exposto, observa-se que o modelo é sensível sob duas perspectivas: a primeira é em relação ao FC , o qual se mostrou crucial tanto para o cálculo do custo total de transporte, quanto para a decisão de utilizar o modal aéreo, terrestre ou híbrido (com transbordo); e a segunda à detenção das informações precisas acerca dos voos extraordinários e das demandas postergadas.

6. Conclusão

Neste artigo introduzimos o HALRPPA atendendo completamente o escopo delimitado neste estudo, ou seja, no roteamento intermodal (aeroterrestre) de transporte de cargas, em um órgão que possui frota própria para ambos os modais. Aplicando-o no caso real, o modelo retornou expressivas oportunidades de redução de custos, atingindo o limite de tempo com demandas superiores a 19. Contudo, conforme destacado na Seção 4.1, o modelo não leva em consideração as restrições legais de jornada de trabalho o que, invariavelmente, reduziria a quantidade de demandas atendidas por rotas. Além disso, a questão do *pickup-and-delivery* também influencia diretamente no planejamento. Caberiam estudos futuros para preencher essa lacuna.

Embora haja a necessidade de incorporar ao modelo algumas variáveis para melhor adequar à realidade enfrentada pelo órgão, a partir deste estudo é possível obter conclusões relevantes acerca do roteamento intermodal de cargas. Primeiramente, dado o alto custo absoluto do modal

aéreo, é crucial que o órgão possua claramente definida qual o FC , ou seja, a porcentagem de importância atribuída à utilização de aeronaves (os aviões já estariam realizando os trajetos para outros fins? Ou as LAP foram definidas exclusivamente para o transporte de cargas?); seria interessante um estudo específico para definir as métricas de cálculo do FC . O segundo é a oportunidade de ganho com o emprego mais eficiente das rotas terrestres, através da consolidação de vários trajetos curtos em uma única rota, utilizando-se melhor a capacidade disponível dos veículos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processos 313521/2017-4 e 425962/2016-4, e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- Archetti, C. e Peirano, L. (2020). Air intermodal freight transportation: The freight forwarder service problem. *Omega*, 94:15.
- Baldacci, R., Hadjiconstantinou, E., e Mingozzi, A. (2004). An exact algorithm for the capacitated vehicle routing problem based on a two-commodity network flow formulation. *Operations Research*, 52:723–738.
- Braekers, K., Ramaekers, K., e Nieuwenhuyse, I. V. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99:300–313.
- Chang, T. S. (2008). Best routes selection in international intermodal networks. *Computers & Operations Research*, 35:2877–2891.
- Dantzig, G. B. e Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management Science*, 6: 80–91.
- Desrochers, M. e Laporte, G. (1991). Improvements and extensions to the miller-tucker-zemlin subtour elimination constraints. *Operations Research Letters*, 10(1):27–36.
- Feng, B., Li, Y., e Shen, Z.-J. M. (2015). Air cargo operations: Literature review and comparison with practices. *Transportation Research Part C*, 56:263–380.
- Gavish, B. e Graves, S. C. (1982). Scheduling and routing in transportation and distribution systems: Formulations and new relaxations. Working Paper 8202, Graduate School of Management, University of Rochester.
- Huang, K., Lee, Y.-T., e Xu, H. (2020). A routing and consolidation decision model for containerized air-land intermodal operations. *Computers & Industrial Engineering*, 141:10.
- Laporte, G. (2007). What you should know about the vehicle routing problem. *Naval Research Logistics*, 54:811–819.
- Laporte, G. (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43:408–416.
- Laporte, G. e Norbert, Y. (1987). Exact algorithms for the vehicle routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 31:147–184.
- Miller, C. E., Tucker, A., e Zemlin, R. (1960). Integer programming formulation of traveling salesman problems. *Journal of the ACM*, 7:326–329.
- Vidal, T., Laporte, G., e Matl, P. (2020). A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants. *European Journal of Operational Research*, 286:401–416.