



ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

Energias Limpas nas Engenharias

CONSOLIDAÇÃO DE CARGA NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO: UMA PROPOSTA ON-LINE

Tarek Nasser Sati

Engenharia de Produção – Universidade Federal do Paraná

Cassius Tadeu Scarpin

Administração – Universidade Federal do Paraná

Aline Raquel Frazon de Oliveira

Engenharia de Produção – Universidade Federal do Paraná

Carla Regina Mazia Rosa

Engenharia de Produção – Universidade Federal do Paraná

Resumo: A consolidação de cargas é uma prática essencial no transporte rodoviário, especialmente no Brasil, que busca otimizar o uso da capacidade dos veículos em termos de peso e volume. Embora essa prática possa aumentar custos devido ao manuseio adicional, à necessidade de instalações e ao possível aumento do tempo de viagem, há uma grande probabilidade de redução do custo total. Essa economia é gerada pela melhor utilização dos veículos e da frota, já que custos operacionais, como combustíveis, representam a maior parte dos gastos logísticos. A consolidação de cargas no transporte rodoviário é uma estratégia estudada desde os anos 1970 e tem sido um diferencial para transportadoras. Este trabalho aborda a consolidação no transporte rodoviário brasileiro, explorando técnicas, metodologias e resultados. Propõe-se uma matheurística que utiliza heurísticas para criar caminhos entre origem e destino, integrando um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para reduzir combinações no grafo completo. O framework foi inteiramente desenvolvido na plataforma *OutSystems*, com o modelo resolvido utilizando o solver *Gurobi*, acessado via API. A programação foi feita em C#, com gerenciamento na nuvem. Os resultados indicam pouca variação na função objetivo para diferentes cenários, sendo possível solucionar uma instância com 40 demandas e 10 terminais em até 38 segundos, com pequeno impacto no tempo para resolução *on-line*.

Palavras-chave: Consolidação de Carga. Gestão da Cadeia de Suprimentos 4.0. Programação em Nuvem. Programação Linear Inteira Mista. Metaheurística.

CARGO CONSOLIDATION IN ROAD TRANSPORTATION: AN ONLINE PROPOSAL

Abstract: Cargo consolidation is an essential practice in road transport, particularly in Brazil, aimed at optimizing the use of vehicle capacity in terms of weight and volume. Although this practice may increase costs due to additional handling, facility requirements, and potential travel time increases, there is a high likelihood of reducing the overall cost. These savings are generated by better utilization of vehicles and the fleet, since operating costs, such as fuel, represent the largest part of logistics expenses. Load consolidation in road transport has been a strategy studied since the 1970s and is a differentiator for carriers. This paper addresses consolidation in Brazilian road transport,

exploring techniques, methodologies, and results. A matheuristic approach is proposed, using heuristics to create paths between origin and destination, integrating a Mixed Integer Linear Programming (MILP) model to reduce combinations in the complete graph. The entire framework was developed on the *OutSystems* platform, with the model solved using the Gurobi solver, accessed via API. The programming was done in C#, with cloud management. The results indicate little variation in the objective function for different scenarios, making it possible to resolve an instance with 40 demands and 10 terminals in up to 38 seconds, with little impact on the time for online resolution.

Keywords: Cargo Consolidation. Supply Chain Management 4.0. Cloud Programming. Mixed Integer Linear Programming. Matheuristics.

1. Introdução

De acordo com Schroeder e Castro (1996), desde a década de 1950, o transporte rodoviário de carga é tido mundialmente como um dos principais meios de transporte de cargas. No Brasil, este era considerado não só como o principal, mas, quase exclusivo meio de transporte de carga até a década de 70, demonstrando grande importância na matriz de transportes do país (SCHROEDER; CASTRO, 1996). O transporte rodoviário corresponde a 64,8% de toda carga transportada dentro do Brasil (CNT, 2021), o que ocasiona grande dependência deste modal. A Tabela 1 apresenta a matriz de transportes referente a fevereiro de 2021, onde nota-se disparidade do modal rodoviário em relação aos demais.

Tabela 1 – matriz do transporte de cargas

Modal	Bilhões (TKU)	Participação (%)
Rodoviário	1.548,0	64,86
Ferrovário	356,8	14,95
Cabotagem	249,9	10,47
Hidroviário	125,3	5,25
Dutoviário	106,1	4,45
Aéreo	0,6	0,03
Total	2.386,7	100,00

Fonte: CNT (2021)

Existem duas categorias de serviços prestados no transporte rodoviário de carga: *Less-Than-Truckload* (LTL), ou Carga Fracionada, e *Full-Truckload* (TL), ou Carga Completa. A categoria LTL possui o espaço total do veículo ou caminhão dividido entre diferentes cargas e diferentes clientes. Esta categoria é caracterizada por preços médios de carga mais altos por unidade transportada, pois o veículo realiza mais carregamentos/descarregamentos e não possui uma rota direta. A implicação de não possuir uma rota direta é a necessidade de o veículo percorrer diversos trechos entre uma origem e um destino. Define-se “trecho” como a distância entre dois pontos intermediários de entregas/coletas. Na categoria TL, o veículo tem ocupado todo o seu espaço ou tem um contrato de exclusividade, independente da ocupação, com apenas uma carga e cliente. Em geral, o preço da carga, neste caso, é mais baixo e a rota realizada é direta, ou seja, existe apenas um trecho entre a origem e o destino (VERGARA; ROOT, 2013).

De acordo com Crainic *et al.* (2018) a categoria LTL foi reportada em 2012 como uma indústria de aproximadamente 30 bilhões de dólares nos Estados Unidos (EUA), as transportadoras LTL costumam gastar milhões de dólares em custos de transporte e manuseio a cada semana. O transporte de carga impõe para o motorista, em geral, longos trechos e períodos fora de casa. Muitas vezes para suprir as longas distâncias impostas, os motoristas acabam dirigindo por muitas horas seguidas. Essas horas trabalhando podem ultrapassar o limite estipulado pela Lei nº 13.103/2015 de março de 2015, que limita a carga horária em 10h diárias. Outra lei existente com o objetivo de melhorar as condições de vida dos motoristas de caminhão é a Lei nº 13.703, de 8 de agosto de 2018, que instituiu a política nacional de pisos mínimos. Esta lei determina que o transporte rodoviário de cargas passa a ter seu frete remunerado em patamar igual ou superior aos pisos mínimos pré-fixados, atualizados conforme decisão governamental.

Uma possível solução, visando a redução do custo de transporte, é a consolidação de cargas, doravante chamada de “consolidação”. A consolidação consiste em agrupar em um mesmo veículo, ou container, diferentes cargas com origens (ou destinos) diferentes, a fim de reduzir o custo total com o transporte. A consolidação ocorre como uma etapa intermediária em uma rede de distribuição de uma transportadora LTL. Suas remessas geralmente envolvem origens e destinos diferentes, constituindo uma rede muitos-para-muitos (CRAINIC *et al.*, 2018).

De acordo com Guastaroba *et al.* (2016), no geral, uma rede de distribuição é caracterizada pelo transporte de bens e matérias-primas por um conjunto de origens até um conjunto de destinos e, possivelmente, por meio de um conjunto de instalações intermediárias. Apesar do uso de instalações intermediárias apresentar uma maior distância percorrida entre a origem e o destino, quando comparadas ao transporte direto, estas instalações desempenham um papel importante na rede de distribuição, onde economias de escala podem ser atingidas pela consolidação de cargas. Economias de escala ocorrem quando se diminui o custo médio do transporte, segundo Guastaroba *et al.* (2016), sendo que esta economia ocorre na consolidação devido ao melhor aproveitamento da capacidade dos veículos.

Trabalhos relacionados à consolidação de carga em instalações intermediárias são encontrados na literatura há mais de 40 anos. Geoffrion e Graves (1974) são conhecidos por serem um dos primeiros a investigar o uso de instalações intermediárias para consolidação de cargas entre fornecedores e clientes.

Geoffrion e Graves (1974) formularam o problema com Programação Linear Inteira Mista (PLIM) e desenvolveram uma técnica de solução baseada na decomposição de Benders. O algoritmo foi aplicado com sucesso a um problema real de uma grande empresa de alimentos com 17 classes de commodities, 14 plantas, 45 possíveis centros de distribuição e 121 zonas de clientes. Segundo os autores, o uso dessas instalações permite a concentração de carregamentos em um número reduzido de rotas, gerando economias de escala.

A consolidação pode aumentar o percentual de utilização da capacidade de carga dos veículos, reduzindo o custo total do transporte. Entregas diretas devem ser utilizadas quando o carregamento preenche a capacidade do veículo, a distância entre a origem e o destino é muito curta ou em casos de forte restrição de tempo. Nos demais casos, a consolidação pode ser utilizada para reduzir o custo, podendo ocorrer dentro de uma empresa transportadora ou em colaboração entre diferentes empresas de transporte (GUASTAROBA *et al.*, 2016).

Este trabalho apresenta os conceitos básicos envolvidos na consolidação de carga, as possibilidades de modelagem para resolver este problema, os métodos mais utilizados na literatura e uma proposta de abordagem de solução matheurística para o problema. Esta proposta utiliza uma heurística e um novo modelo matemático, a qual visa possibilitar a redução do custo com o transporte rodoviário de cargas. Apresenta-se uma metodologia de solução on-line, em uma aplicação *web*, com uma abordagem integradora entre interface de entrada e saída de dados, com a solução do problema de consolidação de cargas por meio de API's.

2. Metodologia

A metodologia consiste em um conjunto detalhado e sequencial de métodos e técnicas científicas realizados ao longo da pesquisa. Devem ser atingidos os objetivos inicialmente propostos na pesquisa e os critérios metodológicos de maior eficácia, maior rapidez, maior confiabilidade de informação e menor custo (BARRETO; HONORATO, 1998). Neste

capítulo apresenta-se uma proposta de abordagem para o problema de consolidação de cargas. Primeiramente é feita a descrição do problema, seguido pelas etapas metodológicas.

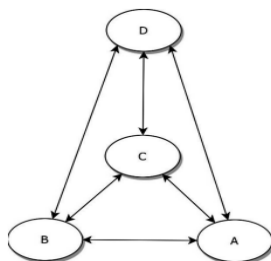
2.1 Descrição do problema

Como exemplo para o problema abordado neste trabalho, considera-se uma determinada embarcadora fictícia que possui 4 CDs (A, B, C e D) e um veículo próprio. Suponha que esta embarcadora possui 2 demandas (X e Y), e no momento do planejamento das rotas, o veículo próprio da transportadora encontra-se em B. As características das demandas estão descritas a seguir:

- Demanda X:
 - CD de origem: A;
 - Horário de coleta: 01/01/2021 20h;
 - CD de destino: D;
 - Horário de entrega: 02/01/2021 12h;
 - Tamanho: 2 paletes.
- Demanda Y:
 - CD de origem: B;
 - Horário de coleta: 01/01/2021 16h;
 - CD de destino: D;
 - Horário de entrega: 02/01/2021 12h;
 - Tamanho: 25 paletes.

A Figura 1 representa o grafo desta rede, onde é possível verificar todos os CDs da embarcadora, assim como os possíveis trechos entre estes.

Figura 1 – GRAFO DOS CDS DA EMBARCADORA



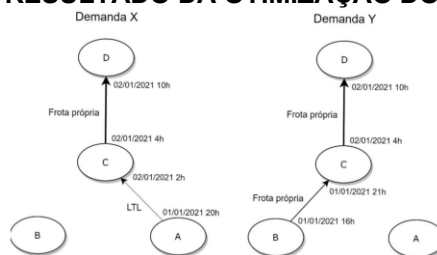
Fonte: autor

O resultado do planejamento após a otimização é o seguinte:

- Demanda X: A carga parte do CD A às 20h do dia 01/01/2021, por meio de um veículo terceirizado, categoria LTL, e chega ao CD C às 2h do dia 02/02/2021. Em C, a carga da demanda X é consolidada com a carga da demanda Y. Ambas partem de C às 4h do dia 02/01/2021, utilizando o veículo de frota própria, e chegam às 10h em D.
- Demanda Y: A carga parte do CD B às 16h do dia 01/01/2021, utilizando o veículo de frota própria da embarcadora, e chega ao CD C às 21h do mesmo dia. A carga é mantida em C até às 2h do dia 02/01/2021, momento em que a carga desta demanda é consolidada com a carga da demanda X. Após a consolidação, ambas partem do CD C, utilizando o veículo de frota própria, e chegam às 10h em D.

A Figura 2 apresenta o resultado da otimização do planejamento, onde é possível verificar, os trechos percorridos pela carga de cada uma das demandas, com a demanda X à esquerda e a demanda Y à direita. Na figura, a linha pontilhada corresponde ao transporte LTL sem consolidação, a linha contínua fina corresponde ao transporte de frota própria sem consolidação e a linha contínua grossa corresponde ao transporte de frota própria com consolidação.

Figura 2 — RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO DO EXEMPLO



Fonte: autor

Visa-se encontrar resultados para problemas como este, porém, de maior escala, com características similares ao exemplo apresentado acima.

2.2 Etapas metodológicas

O estudo foi realizado seguindo as seguintes etapas:

1. Coleta de dados;
2. Formulação e validação do modelo PLIM;
3. Formulação heurística e validação matheurística;
4. Programação em *OutSystems* e testes computacionais;

3. Desenvolvimento do modelo e testes

3.1 Modelo matemático

O modelo proposto, inspirado no modelo utilizado por Erera *et al.* (2013) e Lindsey *et al.* (2016), nos quais utiliza-se apenas a categoria de frota própria, possui as restrições e a função objetivo similares às referências da literatura. A utilização de diferentes categorias de transporte foi inspirada em Lapierre *et al.* (2004), que consideram 4 diferentes categorias de transporte, LTL, TL, frota própria e encomendas, sendo o último não utilizado neste trabalho. O objetivo do modelo é minimizar o custo total do transporte de carga, utilizando veículos homogêneos e apenas um tipo de *comodity*, medido em quantidade de paletes. De forma prática, os itens transportados podem ser diferentes, mas como se tem o transporte paletizado de forma concretizada na logística, uma vez paletizado, considera-se como sendo um único *comodity*. O resultado do modelo deve determinar:

- Alocação das demandas nos veículos;
- Consolidações das cargas;
- Contratações de veículos terceiros (TL e LTL) para suprir o transporte das demandas;
- Movimentos dos veículos de frota própria;
- Data e hora de todos os carregamentos e descarregamentos das cargas das demandas;
- Data e hora de todos os trechos das cargas das demandas.

A formulação parte de um grafo $G(N, A)$, onde N é o conjunto de nós, com um nó equivalente a um terminal em um instante de tempo, e A é o conjunto de arcos, com um arco equivalente a um trecho em um instante de tempo. Tem-se os seguintes conjuntos: U é o conjunto de terminais da rede, $U \subset N$; P é o conjunto de caminhos; e K é o conjunto de demandas. Desta forma, o tempo (índice t) é utilizado implicitamente no modelo, por meio dos conjuntos N e A . Portanto, os índices utilizados no modelo são:

- u : Terminais da rede. $u \in U$.
- d : Terminais de destino. $d \in U$.
- n : Nós, um terminal em um instante de tempo. $n \in N$. $n(u, t)$.

- a : Arcos, trechos (conexões de terminais) que ocorrem em um instante de tempo. $a \in A$.
- $\delta^+(n)$: Arco de saída do nó n . $\delta^+(n) \in A$.
- $\delta^-(n)$: Arco de chegada ao nó n . $\delta^-(n) \in A$.
- k : Demandas, cargas a serem transportadas com origem e destino. $k \in K$.
- p : Caminhos, sequência de arcos no. $p \in P$.
- v : Tipo de veículo. $v = 0$ ou f , para frota própria.
 - 1 ou l , para LTL.
 - 2 ou t , para TL.

Os parâmetros necessários para o modelo proposto são:

- q_k : Tamanho da demanda k medido em fração de veículo. Deve ser maior que 0 e menor que 1.
- C_{fav} : Custo fixo do arco a , utilizando o tipo de transporte v .
- C_{vav} : Custo variável do arco a , utilizando o tipo de transporte v .
- C_{dpk} : Custo de penalização da demanda k utilizando o caminho p .
- N_{vn0} : Número de veículos de frota própria disponíveis no nó n ($u, 0$), no instante de tempo 0.

Com isto, tem-se que as variáveis de decisão são assim definidas:

- x_{pk} : Tem valor 1, caso a demanda k utilize o caminho p . Tem valor 0, caso contrário.
- τ_{av} : Número de veículos do tipo de transporte v que passam pelo arco a . Variável contínua.
- τ_{iav} : Número de veículos do tipo de transporte v que passam pelo arco a . Variável inteira.
- N_{vn} : Número de veículos de frota própria disponíveis no nó n (u, t).
- N_{vn}^- : Número de veículos de frota própria disponíveis no nó n ($u, t - 1$).

A função objetivo do modelo é a seguinte:

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{v \in V} \sum_{a \in A} C_{fav} \tau_{iav} + \sum_{v \in V} \sum_{a \in A} C_{vav} \tau_{av} + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P(k)} x_{pk} C_{dpk} \quad (0)$$

Com objetivo de minimizar a soma dos custos de transporte (custo fixo e variável) de cada tipo de transporte e os custos de penalização por entrega atrasada. O modelo matemático está sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{p \in P(k)} x_{pk} = 1 \quad \forall k \in K, \quad (1)$$

As restrições em (1) garantem que exatamente um caminho p , seja escolhido para cada demanda k .

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P(k): a \in p} q_k x_{pk} \leq \sum_{v \in V} \tau_{av} \quad \forall a \in A: u_1 \neq u_2, \quad u_1 \in a, \quad u_2 \in a, \quad (2)$$

As restrições em (2) garantem que, para cada arco com terminal de origem diferente do terminal de destino, o somatório do tamanho das demandas, medido em percentual de ocupação de veículos, de cada caminho que passa por este arco, deve ser menor ou igual ao somatório do número de veículos de cada tipo de transporte passando neste arco. É uma restrição de capacidade, que garante que tenham veículos suficientes para transportar a carga atribuída a cada arco.

$$\tau_{av} \leq \tau_{iav} \quad \forall a \in A: u_1 \neq u_2, \quad u_1 \in a, \quad u_2 \in a, \quad \forall v \in V, \quad (3)$$

As restrições em (3) definem que o número inteiro de veículos de cada tipo de transporte, que passam em cada arco, cuja origem difere do destino, deve ser maior ou igual ao número contínuo de veículos, de cada tipo de transporte, que passam neste arco. Esta restrição força que seja utilizado 1 veículo a mais no transporte, a cada 100% de ocupação.

$$\sum_{a \in \delta^+(n): u_1 \neq u_2, u_1 \in a, u_2 \in a} \tau i_{avf} \leq Nv_n \quad \forall n \in N, t = 0, \quad (5)$$

$$Nv_n = Nv_{n0} \quad \forall n \in N, t = 0, \quad (4)$$

As restrições em (4) garantem que o número de veículos de frota própria disponíveis em cada terminal no instante $t = 0$, seja igual ao parâmetro Nv_{n0} , que é o número de veículos de frota própria disponíveis no instante do planejamento, em cada terminal.

As restrições em (5) garantem que para cada nó, no instante $t = 0$, o somatório do número de veículos de frota própria que saem de um nó, com destino diferente do nó de saída, seja menor ou igual ao número de veículos de frota própria disponíveis neste nó. Essas restrições garantem equilíbrio de fluxo no instante de tempo inicial ($t = 0$).

$$Nv_n + \sum_{a \in \delta^+(n-)} \tau i_{avf} = Nv_{n-} + \sum_{a \in \delta^-(n)} \tau i_{avf} \quad \forall n \in N, t > 0, u_1 \neq u_2, u_1 \in a, u_2 \in a, \quad (6)$$

As restrições em (6) garantem que para cada nó, com instante de tempo $t > 0$, o número de veículos de frota própria disponíveis em um terminal no instante t (Nv_n), somado ao número de veículos de frota própria que saíram deste terminal no instante de tempo $t - 1$, deve ser igual ao número de veículos de frota própria disponíveis neste terminal no instante $t - 1$

$$x_{pk} \in \{0,1\}, \tau_{av} \geq 0, \tau i_{av} \in Z_+, Nv_n \in Z_+ \quad (7)$$

($Nv_n -$), somado ao número de veículos de frota própria que chegam neste terminal, no instante de tempo t . Essas restrições garantem equilíbrio de fluxo após o instante de tempo inicial ($t > 0$).

As restrições em (7) definem o domínio das variáveis utilizadas no modelo.

3.2 Testes

Para efetuar os testes, foram realizadas considerações acerca da matheurística, a fim de fixar parâmetros, variando apenas os custos de categorias de transporte. As considerações realizadas foram as seguintes:

- Para o cálculo da distância entre os terminais das cidades, foi utilizado o cálculo de distância haversine, que possui uma aproximação de distância mais precisa, por levar em consideração a curvatura da terra;
- Para o cálculo do tempo de duração de cada trecho, foi considerada uma velocidade média de 60km/h para os veículos;
- Foi considerado um tamanho único de veículo de transporte, sendo este uma carreta com capacidade para 32 paletes;
- Foi utilizada uma discretização de tempo de 4h, ou seja, para o modelo matemático 1 tempo equivale a 4h. Em termos práticos, cada ação só pode ser realizada de 4 em 4 horas (no mínimo);
- Os trechos iniciam ao final de cada período de tempo e devem levar, pelo menos, um período para ocorrer. Dessa maneira o carregamento e descarregamento dos veículos deve ocorrer no intervalo de tempo restante do período. Um exemplo desta consideração é uma demanda que chega a um terminal as 13h, que equivale a chegar no período de 12h a 16h. A carga desta demanda pode ser descarregada e

carregada em outro veículo até as 16h, horário a partir do qual esta demanda já está disponível para um novo trecho;

- Caso uma determinada demanda seja entregue após o horário de entrega, existe uma penalização na função objetivo de 1 (adimensional) multiplicado pelo número de períodos de atraso, no caso dos testes deste trabalho, a cada 4h de atraso.

Como resultado dos testes, foi realizado um comparativo de 13 indicadores logísticos e de otimização, são eles:

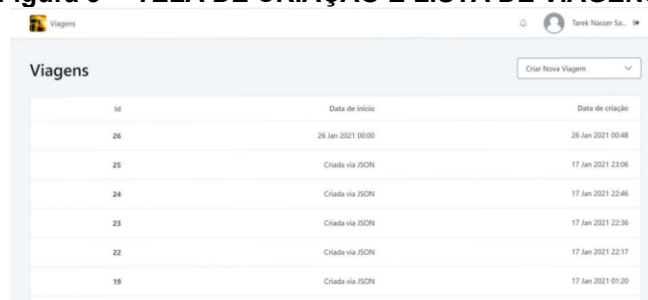
- Z: Valor da função objetivo;
- Tempo para resolver: Tempo total, em segundos, para resolver a matheurística;
- Tempo para otimizar: Tempo, em segundos, para resolver a parte exata;
- Distância total percorrida: Distância total percorrida pelos veículos, em quilômetros;
- Trechos realizados com frota própria: Percentual de trechos realizados com veículos de frota própria;
- Trechos realizados com LTL: Percentual de trechos realizados com veículos LTL;
- Trechos realizados com TL: Percentual de trechos realizados com veículos TL;
- Ocupação dos veículos de frota própria: Percentual de ocupação média dos veículos de frota própria;
- Ocupação dos veículos LTL: Percentual de ocupação média dos veículos LTL;
- Ocupação dos veículos TL: Percentual de ocupação média dos veículos TL;
- Trechos percorridos com veículos vazios: Número de trechos realizados com veículos vazios;
- Demandas entregues com atraso: Número de demandas entregue com atrasos;
- Tempo médio de atraso: Tempo médio, em horas, de atraso das demandas, desconsiderando demandas com atraso nulo.

Os testes realizados demonstraram uma variação positiva dos indicadores logísticos, ao alterar os custos de cada categoria, onde as variações acompanharam o acréscimo e decréscimo dos valores relacionados a cada categoria de transporte. Obteve-se, também, que nenhum dos testes realizados transportou veículos vazios, além de nenhum possuir demandas com atraso. A partir dos resultados dos testes on-line, verificou-se que houve pequeno aumento no tempo, devido a integração por API. Em média, as instâncias 1, 2, 3, 4 e 5, obtiveram um aumento no tempo despendido, para efetuar a integração de, respectivamente, 0,26s, 0,28s, 0,43s, 0,51s e 3,45s. Entre a integração e a disponibilização de toda a interface *web*, foram despendidos adicionais 0,21s, 0,22s, 0,21s, 0,23s, 0,81s, para cada uma das instâncias. Este tempo acrescido tem pouquíssima relevância, em termos de tempo computacional total para resolver o problema.

4. Resultados e discussão – aplicação web

A interface foi desenvolvida com a seguinte lógica de uso. Inicialmente é necessário criar viagens. A criação pode ser feita de duas diferentes maneiras, manualmente, ou por meio de um arquivo no formato JSON (*JavaScript Object Notation*). A tela de viagens é demonstrada na Figura 3 e o botão de criação de viagens na Figura 4.

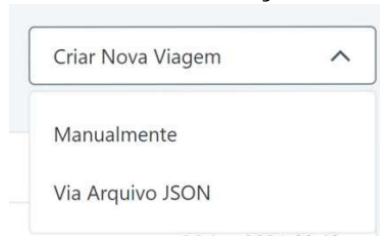
Figura 3 – TELA DE CRIAÇÃO E LISTA DE VIAGENS



ID	Data de início	Data de criação
26	26 Jan 2021 00:00	26 Jan 2021 00:48
25	Criada via JSON	17 Jan 2021 23:06
24	Criada via JSON	17 Jan 2021 22:46
23	Criada via JSON	17 Jan 2021 22:36
22	Criada via JSON	17 Jan 2021 22:17
19	Criada via JSON	17 Jan 2021 01:20

Fonte: autor

Figura 4 – BOTÃO DE CRIAÇÃO DE VIAGENS

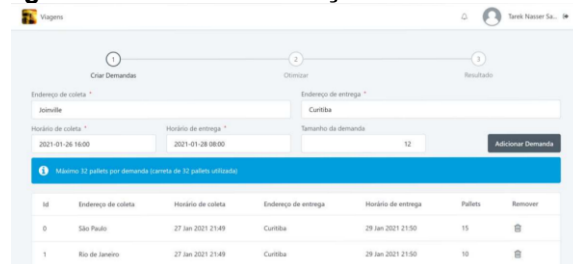


Fonte: autor

Para a criação manual, são seguidos os seguintes passos:

- Passo 1: É realizada a criação de demandas. Para cada demanda, é necessário informar seu tamanho, local e horário de coleta e local e horário de entrega. A Figura 5 mostra os campos de preenchimento deste passo.

Figura 5 – TELA DE CRIAÇÃO DE DEMANDAS

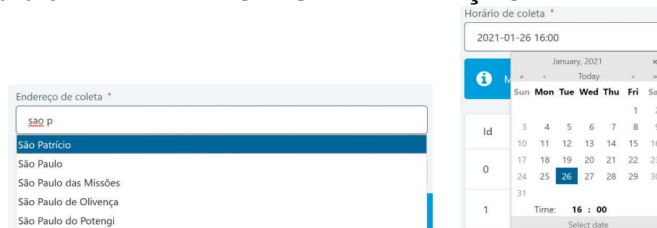


Id	Endereço de coleta	Horário de coleta	Endereço de entrega	Horário de entrega	Palotes	Remover
0	São Paulo	27 Jan 2021 21:49	Curitiba	29 Jan 2021 21:50	15	
1	Rio de Janeiro	27 Jan 2021 21:49	Curitiba	29 Jan 2021 21:50	10	

Fonte: autor

Para facilitar o processo, foram adicionados aceleradores nos campos de coleta e entrega. Programou-se a disponibilização de uma lista com os possíveis endereços e, nos campos de horário, um calendário facilita o processo, como mostrado na Figura 6.

Figura 6 – FACILITADORES PARA CRIAÇÃO DA DEMANDA



Endereço de coleta *

- São P
- São Patrício
- São Paulo
- São Paulo das Missões
- São Paulo de Olivença
- São Paulo do Potengi

Horário de coleta *

2021-01-26 16:00

January 2021

Sun	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Time: 16 : 00
Select date

Fonte: autor

Após adicionar uma demanda, a qual é adicionada à lista de demandas, pode-se editá-la e/ou excluí-la, caso o usuário tenha completado incorretamente a mesma. Finalizando este passo, o usuário pode avançar e salvar as demandas, clicando no botão “Avançar”, conforme a Figura 7.

Figura 7 – AVANÇAR E SALVAR DEMANDAS



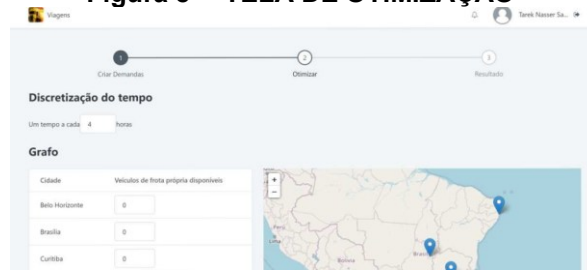
Id	Endereço de coleta	Horário de coleta	Endereço de entrega	Horário de entrega	Palotes	Remover
7	Recife	26 Jan 2021 21:49	Garuva	29 Jan 2021 21:50	15	
8	Recife	26 Jan 2021 21:49	Belo Horizonte	29 Jan 2021 21:50	10	
9	Belo Horizonte	26 Jan 2021 21:49	Brasília	28 Jan 2021 21:50	31	
10	Belo Horizonte	26 Jan 2021 21:49	Londrina	28 Jan 2021 21:50	7	
11	Curitiba	27 Jan 2021 22:05	São Paulo	30 Jan 2021 22:05	10	
12	Curitiba	27 Jan 2021 22:05	São Paulo	30 Jan 2021 22:05	10	
13	Curitiba	27 Jan 2021 22:05	São Paulo	30 Jan 2021 22:05	10	
14	Curitiba	27 Jan 2021 22:05	São Paulo	30 Jan 2021 22:05	1	

Avançar

Fonte: autor

- Passo 2: Neste passo, configura-se a discretização do tempo e são definidas as quantidades de veículos de frota própria disponíveis em cada terminal, no instante de início da viagem, conforme a Figura 8.

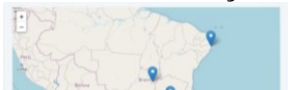
Figura 8 – TELA DE OTIMIZAÇÃO



Fonte: autor

Para tornar o processo mais visual, é disponibilizado um mapa com todos os terminais envolvidos na viagem, conforme ilustrado na Figura 9 a seguir.

Figura 9 – MAPA COM A LOCALIZAÇÃO DOS TERMINAIS



Fonte: autor

Por fim, uma lista com todas as demandas é disponibilizada, para que o usuário possa confirmar e avançar para o próximo passo, clicando no botão “Otimizar”, conforme a Figura 10. Ao clicar neste botão, por meio da API, resolve-se a heurística de geração de caminhos e o modelo matemático, utilizando o *Gurobi*.

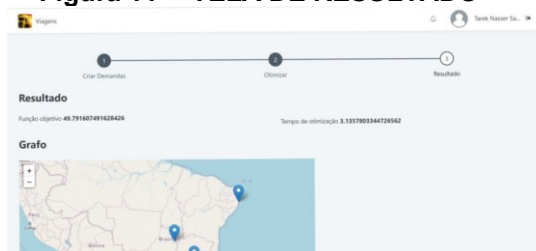
Figura 10 – DEMANDAS E BOTÃO DE OTIMIZAR

Demandas					
ID	Endereço da cidade	Horário da cidade	Endereço da entrega	Horário da entrega	Público
0	São Paulo	27 Jan 2021 21:45	Cuiabá	28 Jan 2021 21:50	15
1	Rio de Janeiro	27 Jan 2021 21:45	Cuiabá	28 Jan 2021 21:50	10
2	Rio de Janeiro	27 Jan 2021 21:45	Cuiabá	28 Jan 2021 21:50	5

Fonte: autor

- Passo 3: Após finalizado o processo de resolução, a resposta é mostrada em tela, na última etapa do processo. Conforme ilustrado na Figura 11, onde é possível visualizar o valor da função objetivo e o tempo, em segundos, despendido na otimização.

Figura 11 – TELA DE RESULTADO



Fonte: autor

Esta tela foi desenvolvida com foco na perspectiva de rota por demanda, ou seja, para cada demanda, é mostrada a sequência de trechos a serem realizados, como evidenciado na Figura 12.

Figura 12 – RESULTADO LISTADO POR DEMANDAS

Demandas					
São Paulo (27 Jan 2021 21:49) - Curitiba (29 Jan 2021 21:50)					
Demanda 0					
Tamanho: 47%					
Rota					
Terminal de início	Horário de início	Terminal de chegada	Horário de chegada	Tipo de veículo	Ocupação
São Paulo	27 Jan 2021 (00:00 - 00:00)	São Paulo	28 Jan 2021 (04:00 - 08:00)	Carga mantida no armazém	0%
São Paulo	28 Jan 2021 (04:00 - 08:00)	Curitiba	28 Jan 2021 (12:00 - 16:00)	Frota própria	94%
Rio de Janeiro (27 Jan 2021 21:49) - Curitiba (29 Jan 2021 21:50)					
Demanda 1					
Tamanho: 31%					
Rota					
Terminal de início	Horário de início	Terminal de chegada	Horário de chegada	Tipo de veículo	Ocupação

Fonte: autor

Para cada demanda, é indicado os terminais a serem visitados, a modalidade de transporte a ser utilizada, o percentual de ocupação em cada veículo e os horários de cada movimento. A Figura 13 mostra o caso de uma demanda, para servir de exemplo, cuja origem é Recife-PE e o destino Garuva-SC. A carga desta demanda ocupa 47% da capacidade de um veículo, valores de ocupação acima de 47%, no trajeto, significam que deve haver consolidação da carga desta demanda com outras no trecho, por exemplo, no segundo trecho, onde é ocupado 94% da capacidade do veículo. Inicialmente, esta demanda (Demanda 7) deve ser mantida no terminal de Recife-PE por 4h. Em seguida, sua carga deve ser consolidada com outras, e ser transportada para o terminal de Belo Horizonte-MG, utilizando a modalidade LTL, com 78% de ocupação. Na sequência, a carga desta demanda deve ser consolidada novamente, chegando à ocupação de 94%, para que o transporte de Belo Horizonte-MG para Curitiba-PR seja realizado, utilizando a modalidade de frota própria. Por fim, a carga da demanda deve ser desconsolidada, e utilizando a modalidade LTL, a carga seja transportada de Curitiba-PR para Garuva-SC.

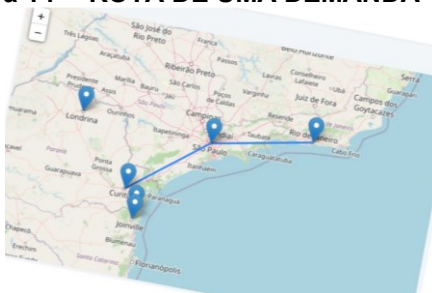
Figura 13 – RESULTADO DE UMA DEMANDA

Demandas					
São Paulo (27 Jan 2021 21:49) - Curitiba (29 Jan 2021 21:50)					
Demanda 0					
Tamanho: 47%					
Rota					
Terminal de início	Horário de início	Terminal de chegada	Horário de chegada	Tipo de veículo	Ocupação
São Paulo	27 Jan 2021 (00:00 - 00:00)	São Paulo	28 Jan 2021 (04:00 - 08:00)	Carga mantida no armazém	0%
São Paulo	28 Jan 2021 (04:00 - 08:00)	Curitiba	28 Jan 2021 (12:00 - 16:00)	Frota própria	94%
Rio de Janeiro (27 Jan 2021 21:49) - Curitiba (29 Jan 2021 21:50)					
Demanda 1					
Tamanho: 31%					
Rota					
Terminal de início	Horário de início	Terminal de chegada	Horário de chegada	Tipo de veículo	Ocupação

Fonte: autor

Clicando em “Mostrar no mapa” é possível visualizar a rota de cada demanda. A Figura 14 demonstra o caso em que a demanda tem origem no Rio de JaneiroRJ, realiza uma parada em São Paulo-SP e finaliza o trajeto chegando na cidade de Curitiba-PR.

Figura 14 – ROTA DE UMA DEMANDA



Fonte: autor

Também são listados todos os trechos planejados, indicando o tipo de transporte e a capacidade.

5. Conclusões

Neste trabalho, foi solucionado o problema de consolidação de cargas por meio de uma proposta matheurística, que utiliza, inicialmente, uma heurística e, em seguida, um modelo de Programação Linear Inteira Mista. A solução foi integrada de maneira inovadora com a plataforma de programação em nuvem, *OutSystems*, onde todo o framework de solução foi desenvolvido). Como resultado, foi possível observar valores da função objetivo muito próximos para todos os cenários de testes, em cada uma das instâncias resolvidas. Em instâncias pequenas, esse valor aparentou convergir para o ótimo global. Os resultados mostraram ser influenciados pelos custos de cada categoria e transporte e, também, dependem da disposição das demandas de cada instância. O trabalho possibilitou acesso à solução de maneira on-line, por meio de um navegador *web*, que pode ser acessado de um computador ou dispositivo móvel. O resultado é um *software* com capacidade de geração de um produto. Dessa maneira, foi possível verificar o desempenho para o desenvolvimento de ferramentas de otimização nas diretrizes e nos conceitos da Indústria 4.0, aplicados à Gestão de Operações e Logística, ou, de forma geral, à Gestão da Cadeia de Suprimentos 4.0. Como sugestão para trabalhos futuros, têm-se, principalmente: aprimorar a heurística de geração de caminhos de demandas, reduzindo a variação do tempo computacional para o mesmo cenário; utilizar um provedor na nuvem com processamento superior, a fim de reduzir o tempo computacional despendido; utilizar custos mais realistas para as categorias de transporte, provenientes da tabela de fretes mínimos para veículos terceirizados e com cálculos de preço do combustível, pedágios, depreciação, entre outros, para frota própria; aprimorar a aplicação *web* proposta, tornando a interface mais amigável ao usuário e integrando as rotas a um roteirizador, de maneira que seja possível visualizar toda a resposta da solução no mapa; e propor uma aplicação *mobile* para os motoristas verificarem suas rotas e cargas a serem carregadas.

Referências

BARRETO, A. V. P.; HONORATO, C. T. **Manual de sobrevivência na selva acadêmica**. Rio de Janeiro: Objeto Direto, 1998.

CNT. **Confederação Nacional do Transporte**, CNT. Boletim Estatístico. Brasília, 2021. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/boletins>>.

CRAINIC, T. G.; HEWITT, M.; TOULOUSE, M.; VU, D. M. Scheduled service network design with resource acquisition and management. **EURO Journal on Transportation and Logistics**, v. 7, n. 3, p. 277–309, 2018.

ERERA, A.; HEWITT, M.; SAVELSBERGH, M.; ZHANG, Y. Improved Load Plan Design Through Integer Programming Based Local Search. **Transportation Science**, v. 47, n. 3, p. 412–427, 2013.

GEOFFRION, A. M.; GRAVES G. W. Multicommodity distribution system design by Benders decomposition. **Management Science**, v. 20, p. 822–844, 1974.

GUASTAROBBA, G.; SPERANZA, M. G.; VIGO, D. Intermediate facilities in freight transportation planning: A survey. **Transportation Science**, v. 50, n. 3, p. 763–789, 2016.

LAPIERRE, S. D.; RUIZ, A. B.; SORIANO, P. Designing distribution networks: Formulations and solutions heuristic. **Transportation Science**, v. 38, n. 2, p. 174–187, 2004.

LINDSEY, K.; ERERA, A.; SAVELSBERGH, M. Improved integer programming-based neighborhood search for less-Than-Truckload load plan design. **Transportation Science**, v. 50, n. 4, p. 1360–1379, 2016.

SCHROEDER, É. M.; CASTRO, J. C. de. Transporte rodoviário de carga no Brasil: situação atual e perspectivas. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 6, p. 173-187, dez. 1996.

VERGARA, H. A.; ROOT, S. Mixed fleet dispatching in truckload relay network design optimization. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 54, p. 32–49, 2013.