

Análise Sobre o Impacto da Escolha da Velocidade dos Veículos em um Problema de Roteamento de Veículos de uma Fábrica de Móveis

Felipe Goulart Moraes¹
PPGEP-So, UFSCar, Sorocaba, SP
Deisemara Ferreira²
DFQM, UFSCar, Sorocaba, SP
Reinaldo Morabito³
DEP, UFSCar, São Carlos, SP

Resumo. Em problemas gerais de roteamento de veículos, sobretudo em problemas integrados de planejamento da produção e distribuição, a velocidade dos veículos não é considerada no momento da tomada de decisões. No entanto, para casos onde as rotas são longas e envolvem janelas de tempo a decisão da velocidade a ser adotada para percorrer os arcos da rota pode ser crucial para obtenção de soluções factíveis. Além disso, a velocidade dos veículos também impacta nas emissões de gases do efeito estufa. Sendo assim, no presente trabalho estamos analisando o impacto da consideração da decisão da velocidade dos veículos nas rotas de um problema integrados de planejamento da produção e roteamento de veículos com custos de emissão de CO_2 . Para tanto é utilizado um modelo de otimização inteira mista que representa um problema real de uma fábrica de móveis de aço. Os experimentos computacionais mostram como essa ferramenta é eficiente na definição e avaliação das decisões de logística.

Palavras-chave. Roteamento de Veículos, Modelos de Otimização Linear Inteira Mista, Indústria de Móveis, *Pollution Routing Problem*.

1 Introdução e Descrição do Problema

Ao mesmo tempo em que as organizações, na busca pela competitividade, visam minimizar custos e maximizar a satisfação do consumidor, no cenário mundial há preocupações a respeito do aumento da produtividade e seu impacto no meio ambiente. Um exemplo são as discussões sobre a emissão de gases do efeito estufa, como o dióxido carbônico equivalente (CO_2), que tem sido um tema de grande repercussão entre acordos de vários países. Uma das etapas da cadeia de suprimentos onde a minimização de CO_2 tem sido estudada é na distribuição dos produtos aos clientes. Na literatura científica relacionada a esse problema os custos das emissões de carbono são calculadas principalmente levando-se em consideração a carga do veículo e o tamanho das rotas. Além disso, há uma decisão a ser tomada sobre a velocidade utilizada no deslocamento do percurso de um cliente para outro. Dependendo da velocidade há mais ou menos emissões de carbono [4].

Adicionalmente, em cenários onde há janela de tempo, ou seja, onde cada cliente estabelece um horário disponível para receber seus pedidos, a consideração da velocidade é essencial não apenas para avaliar as emissões de CO_2 como também para viabilizar as entregas nas janelas de tempo.

¹felipe.goulartmoraes@gmail.com

²deise@ufscar.br

³morabito@ufscar.br

Em um país como o Brasil, que possui rodovias longas e cujas velocidades podem variar de 80km/h até 120km/h, é razoável permitir que o veículo trafegue de um cliente para outro com velocidades diferentes.

No presente trabalho estamos analisando qual o impacto da consideração de diferentes velocidades nas decisões de roteamento dos veículos de entrega. Os custos de emissão de CO_2 também são considerados de forma que as decisões tomadas estejam de acordo com as preocupações ambientais da empresa. Para tanto é utilizado um modelo de otimização inteira mista que representa um problema real de uma fábrica de móveis de aço.

O processo de produção e distribuição da fábrica está representado na figura 1.

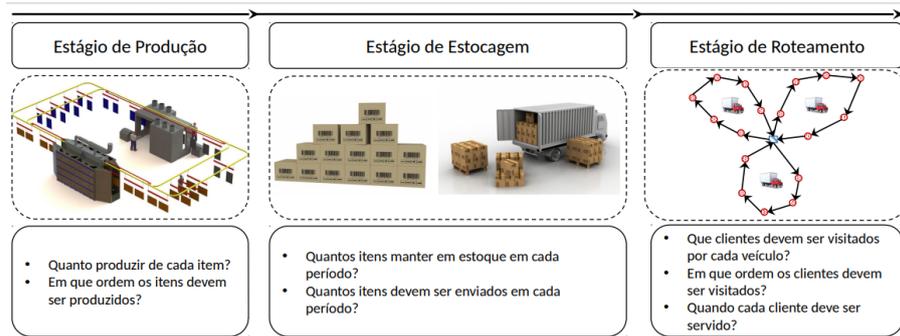


Figura 1: Processo de produção e distribuição indústria de móveis de aço. Fonte: [3].

Cada produto final é composto por partes que são produzidas e deve ser pintadas. A etapa de pintura é o gargalo da produção. A cada troca de cor é necessário um tempo para limpeza da máquina. Esse tempo e os custos relacionados a troca são dependentes da sequência. Assim é necessário definir o tamanho dos lotes e também a sequência de produção dos itens. Na etapa de distribuição é necessário definir quais clientes serão atendidos em quais rotas e qual sequência. Observando as demandas, que devem ser atendidas completamente, e as janelas de tempo de entrega definidas pelo cliente.

O critério de otimização (função objetivo do modelo) é a minimização dos custos, sendo eles: custos de estoque + custos de troca + custos combustível e carbono.

Os custos de combustível e carbono são multiplicados pelos termos que representam o desempenho do motor do veículo (esse termo depende da velocidade do veículo na rota), resistência do ar (também depende do tipo da velocidade utilizada), a distância percorrida e a carga do veículo [3][4].

O modelo matemático que representa o problema é composto por 32 restrições, e por questões de espaço não será descrito no presente texto. No entanto, as restrições são clássicas e bem conhecidas da literatura relacionada. As restrições de problemas de planejamento da produção e de roteamento de veículos podem ser encontradas em [3] e, restrições de consideração de emissão de crédito de carbono em [1] e [4].

2 Experimento Computacional

O objetivo do experimento computacional é avaliar a qualidade das soluções comparando a solução de uma instância do problema onde é permitido apenas a velocidade de 80km/h (denominada instância 1A) com uma solução onde o modelo matemático pode escolher entre três velocidades 80km/h, 70km/h e 60km/h (denominada instância 1B).

As cidades selecionadas como clientes foram: São Paulo, Campinas, Sorocaba, Rio de Janeiro e Belo Horizonte.

Os demais dados utilizados são dados obtidos da literatura científica [3], [4] e alguns dados foram gerados aleatoriamente. A lista completa desses parâmetros podem ser encontradas em [2].

A velocidade de 80km/h foi escolhida a partir de um experimento computacional onde foram testadas quatro velocidade, 70km/h, 80km/h, 90km/h e 100km/h. Para a instância com 70km/h não foi obtida solução factível, sendo assim comparamos os custos das outras 3 instâncias. A Figura 2 abaixo apresenta os custos totais obtidos.

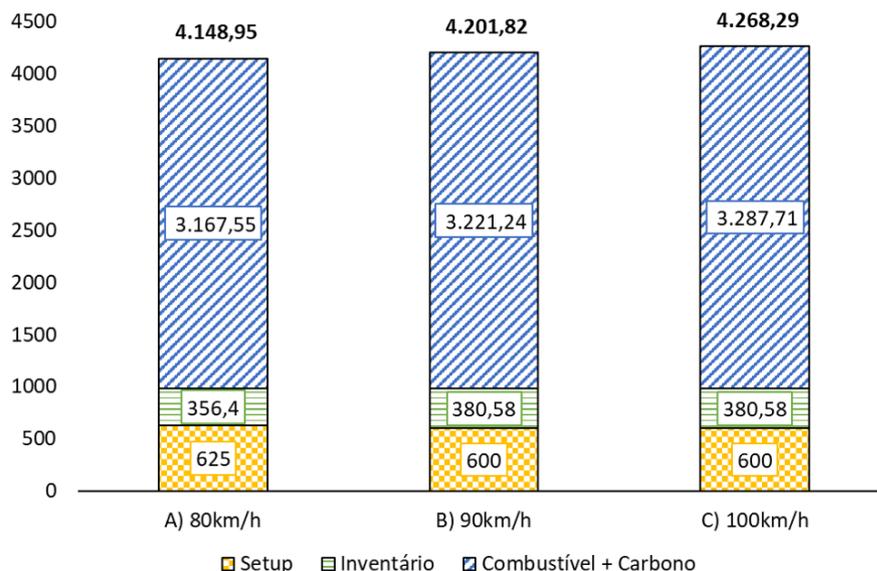


Figura 2: Rotas e velocidades percorridas. Fonte: [2].

Na figura 2, vemos que os custos de troca são de 625 na instância 1A e nas instâncias 1B e 1C são de 600, isso se dá devido a diferença no sequenciamento das rotas. Como as velocidades 90k/m e 100km/h são maiores, conseguem atingir a otimização das sequências de cliente de melhor forma, já a velocidade de 80km/h precisa realizar um sequenciamento que é limitado pelas velocidades. No entanto, há uma compensação no inventário, que é de 356,4 na velocidade de 80km/h e 380,58 nas velocidades de 90km/h e 100km/h. Quando comparamos os custos de Produção + Inventário, para 80km/h temos 981,4 e para as outras velocidades temos 980,58.

A Tabela 1 apresenta os custos obtidos nas soluções das instâncias e, também, a quantidade em quilos de emissão de dióxido de carbono.

Tabela 1: Custos de roteamento de veículos instâncias 1A, 1B e 1C.

Instâncias	A) 80km/h	B) 90km/h	C) 100km/h
Combustível	3.010,41	3.061,43	3.124,60
Motor do Veículo	173,91	154,59	139,13
Peso do Veículo	2.026,50	2.026,50	2.026,50
Carga	545,13	545,13	545,13
Resistência ao Ar	264,89	335,21	413,84
Carbono	157,14	159,81	163,10
Motor do Veículo	9,08	8,07	7,26
Peso do Veículo	105,78	105,78	105,78
Carga	28,46	28,46	28,46
Resistência ao Ar	13,83	17,50	21,60
Combustível + Carbono	3.167,55	3.221,24	3.287,71
Distância	3.617	3.617	3.617
Kg de Carbono	298,89	303,96	310,22

Na tabela 1 verificamos que as distâncias percorridas são iguais, portanto, os custos que vêm do Peso do Veículo são os mesmos. Ao analisarmos a solução, as Cargas levadas nos arcos também são as mesmas e, por isto, não há diferença no valor entre os cenários. No entanto, quando verificamos os termos que têm impacto da velocidade, podemos verificar que os custos: **Motor do veículo**: para a resistência do motor, quanto maior a velocidade, menor é a resistência e, portanto, menor é o consumo. Verificamos isto na tabela, ao observar que os custos são maiores na instância 1A de 80km/h: 182,99 (173,91 do combustível + 9,08 do carbono) e menores na instância 7C de 100km/h: 146,39 (139,13 do combustível + 7,26 do carbono); **Resistência ao ar**: neste cenário quanto maior a velocidade, maior é a resistência ao ar e maior é o consumo de combustível. Vemos que conforme a velocidade aumenta este custo também aumenta, na instância 1A de 80km/h temos custo de 278,72 (264,89 do combustível e 13,83 do carbono) e na instância 1C 100km/h temos 435,22 (413,84 do combustível e 21,6 do carbono). Ao analisarmos estes dois custos na tabela 1, vemos que a Resistência ao Ar representa proporcionalmente um custo maior do que o custo do Motor. Portanto, ao se aumentar a velocidade a partir de 80km/h ocorrerá um gasto maior de combustível. Tendo em vista que percorrer todas as rotas com 80km/h retornou um melhor desempenho na solução, esta instância foi escolhida para a comparação no próximo experimento computacional onde será permitido que cada rota seja percorrida com velocidades diferentes.

2.1 Instância com Velocidades Diferentes para Cada Rota

Na figura 3 A e B estão apresentadas as rotas definidas pela solução das instâncias, também estão indicadas as velocidades escolhidas para cada arco (i, j) 1A e 2 respectivamente.

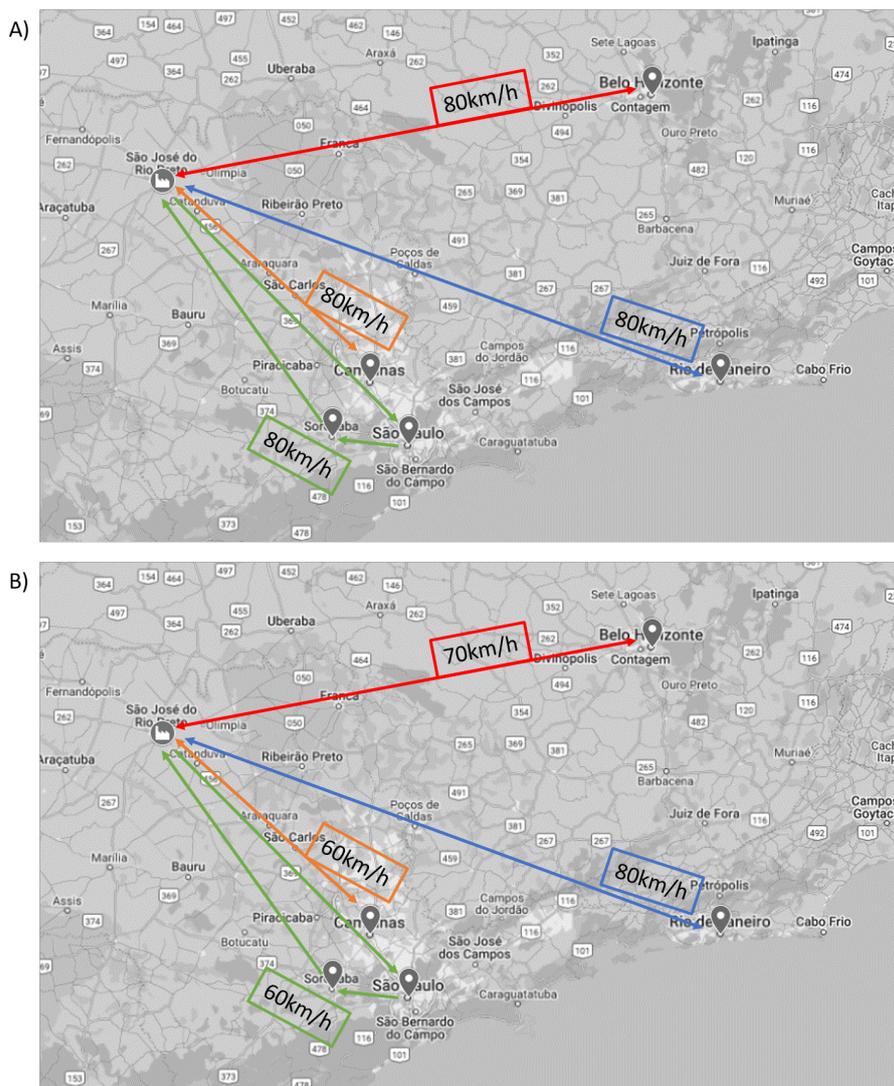


Figura 3: Rotas e velocidades percorridas. Fonte: [2].

É possível ver na Figura 3 que foram geradas 4 rotas (diferenciadas pelas cores, vermelho, azul, laranjado e verde) em ambas as instâncias. Portanto, as distâncias percorridas foram as mesmas. Porém, na instância 1B a velocidade para a rota vermelha foi de 70km/h e nas rotas laranjada e verde a velocidade de 60km/h.

Vale observar que foi realizado um teste adicional com esta instância fixando a velocidade em 60km/h e depois em 70km/h. Para nenhum dos dois casos foram obtidas soluções factíveis. Observamos que para casos de problemas com janelas de tempo a flexibilização da velocidade implica na obtenção de soluções factíveis.

A Tabela 2 apresenta os custos obtidos nas soluções das duas instâncias e, também, a quantidade em quilos de emissão de dióxido de carbono.

Na tabela 2 vemos que os custos relacionados a carga e peso do veículo se mantiveram os mesmos. Isso é esperado pois, nessas instâncias as rotas obtidas foram as mesmas. Em relação ao

Tabela 2: Custos logísticos instâncias 1A e 2 e emissão de carbono.

Instância	A) Velocidade Fixa: 80km/h	B) Velocidade Variável
Custo combustível	3.010,41	2978,24
Motor do Veículo	173,91	202,63
Peso do Veículo	2026,50	2026,50
Carga	545,13	545,13
Resistência ao Ar	264,89	203,97
Custo carbono	157,14	155,46
Motor do Veículo	9,08	10,58
Peso do Veículo	105,78	105,78
Carga	28,46	28,46
Resistência ao Ar	13,83	10,65
Total Combustível + Carbono	3.167,55	3133,71
Kg de Carbono	298,89	295,69

demais custos, ao permitir diferentes velocidades os custos de combustível e emissão de carbono são reduzidos em 33,84 unidades monetárias. Além, disso a quantidade de emissões de dióxido de carbono também é reduzida.

Para avaliar a estabilidade do desempenho do modelo matemático, foram testadas mais duas instâncias, instâncias 2B e 2C. Na Figura 4 estão apresentados os custos totais de combustível+carbono, custos de inventário e custos de *setup*.

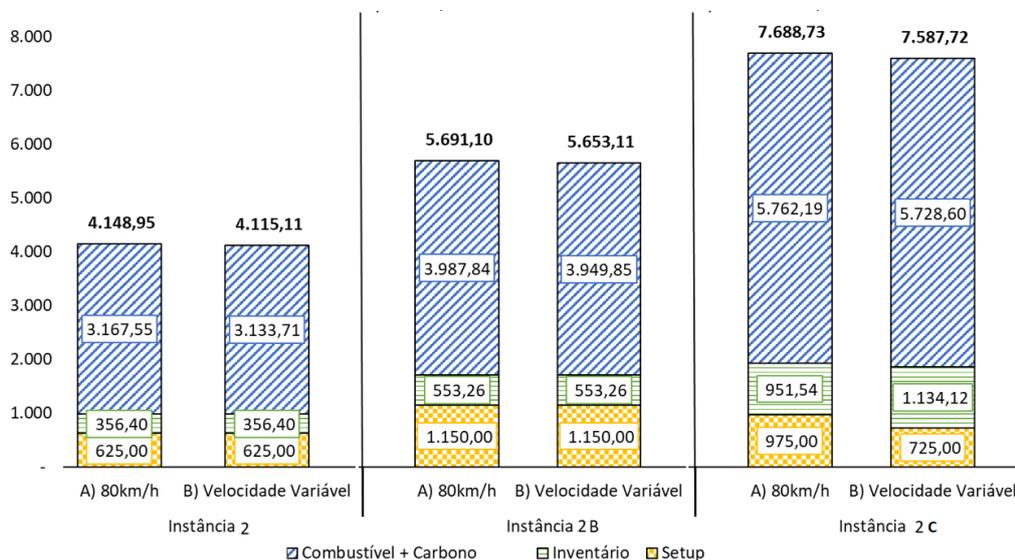


Figura 4: Custos totais instâncias 2, 2B e 2C. Fonte: [2].

Pela Figura 4 vemos que a possibilidade de variar as velocidades nas rotas é realmente mais vantajosa pois, continua diminuindo os custos logísticos mesmo para instâncias maiores.

3 Considerações Finais

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a necessidade da inclusão da possibilidade de diferentes velocidades para definição do roteamento de veículos de uma fábrica de móveis.

Os teste computacionais mostraram que a avaliação da velocidade a ser utilizada nas rotas afeta, não apenas os custos mas também a factibilidade das soluções.

Nos casos avaliados permitir que os veículos atinjam diferentes velocidades ao longo das rotas diminui os custos totais relacionados a combustível e também a emissões de dióxido de carbono.

A pesquisa mostra então que uma ferramenta, como um modelo de otimização inteira mista, é essencial na tomada de decisões, pois permite uma avaliação de diferentes cenários.

Como pesquisa futura é interessante o desenvolvimento de métodos de solução. Isto porque esse modelo é difícil de ser resolvido e para instâncias com mais de 10 clientes a obtenção de soluções factíveis ainda é um desafio.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) -Código de Financiamento 001 e apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) processos 315874/2021-0 e 405702/2021-3, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo 2022/05803-3.

Referências

- [1] T. Bektaş e G. Laporte. “The Pollution-Routing Problem”. Em: **Transportation Research Part B: Methodological** 45.8 (2011), pp. 1232–1250. DOI: 10.1016/j.trb.2011.02.004.
- [2] F. M. Goulart. “Estudo do impacto da consideração de custos de emissão de CO_2 nas decisões de planejamento e roteamento de veículos de uma fábrica de móveis”. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos Campus Sorocaba, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, 2023.
- [3] P. L. Miranda, R. Morabito e D. Ferreira. “Mixed integer formulations for a coupled lot-scheduling and vehicle routing problem in furniture settings”. Em: **Infor** 57.4 (2019), pp. 563–596. ISSN: 19160615. DOI: 10.1080/03155986.2019.1575686.
- [4] R. Qiu, J. Xu, R. Ke, Z. Zeng e Y. Wang. “Carbon pricing initiatives-based bi-level pollution routing problem”. Em: **European Journal of Operational Research** 286.1 (2020), pp. 203–217. ISSN: 03772217. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.03.012.