ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

# Análise ambiental da integração metroferroviária na logística do e-commerce em São Paulo

## Environmental analysis of metro-rail integration in e-commerce logistics in São Paulo

**Pedro Henrique dos Santos Pereira**
Escola Politécnica da USP| São Paulo | Brasil| pedrohspereira@usp.br
**Gabriel Maggio de Moraes**
Escola Politécnica da USP| São Paulo | Brasil| gabriel.maggio@usp.br
**Karin Regina de Castro Marins**
Escola Politécnica da USP| São Paulo | Brasil| karin.marins@usp.br

**Resumo**

Este estudo investiga alternativas mais sustentáveis para o transporte de carga urbano em São Paulo, considerando as perspectivas de adensamento urbano e a necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Utilizando a infraestrutura metroferroviária para transportar a carga urbana relativa ao comércio eletrônico, este trabalho analisa o impacto energético e ambiental dessa solução em comparação ao modelo logístico tradicional baseado em caminhões (cenário controle). Foram processados dados operacionais de empresas transportadoras de mercadorias e da rede metroferroviária, em ferramentas como Python e QGIS, visando analisar o uso de vagões ociosos e dedicados em contraste com o transporte rodoviário convencional. Os resultados mostram que o cenário de vagão ocioso consome cerca de 184 vezes menos energia e emite aproximadamente 104 vezes menos gases de efeito estufa do que o cenário controle. Conclui-se que essa alternativa de transporte é energética e ambientalmente viável, constituindo uma resposta inovadora para o contexto brasileiro, embora se destaque a necessidade de análises complementares que englobam impactos sociais e econômicos.

Palavras-chave: Transporte de carga urbana. Sustentabilidade. Infraestrutura urbana. Suprimento Energético. Adensamento urbano.

**Abstract**

*This study investigates more sustainable alternatives for urban cargo transportation in São Paulo, considering the perspectives of urban densification and the need to reduce dependence on fossil fuels. Utilizing the metro-rail infrastructure to transport urban cargo related to e-commerce, this work analyzes the energy and environmental impact of this solution compared to the traditional logistics model based on trucks (control scenario). Operational data from freight transport companies and the metro-rail network were processed using tools, such as Python and QGIS, to analyze the use of idle and dedicated wagons in contrast with conventional road transport. The results show that the idle wagon scenario consumes about 184 times less energy and emits approximately 104 times less greenhouse gases than the control scenario. It is concluded that this transport alternative is energy and environmentally viable, constituting*

*an innovative response for the Brazilian context, although the need for complementary analyses that encompass social and economic impacts is highlighted.*

*Keywords: Urban freight transport. Sustainability. Urban infrastructure. Energy Supply. Urban densification.*

## INTRODUÇÃO

A rápida urbanização e a crescente dependência de combustíveis fósseis para transporte urbano apresentam desafios significativos para a sustentabilidade ambiental e a qualidade de vida. Segundo a Organização das Nações Unidas [1], a população urbana global deve alcançar 70% até 2050, aumentando a necessidade de sistemas de transporte eficientes e sustentáveis. No Brasil, o setor de transportes é um dos maiores consumidores de energia, com o transporte rodoviário sendo responsável por grande parte das emissões de gases de efeito estufa [2].

Simultaneamente, o crescimento do comércio eletrônico pressiona a demanda por serviços logísticos eficazes [3], dada a necessidade dos consumidores por alternativas sustentáveis para a distribuição de carga urbana.

O comércio eletrônico, envolvendo transações via internet entre pessoas, empresas e o Estado [4], está em constante crescimento, aumentando a demanda por infraestrutura logística para entregas. Esse crescimento gera desafios como maior consumo de energia, mais emissões de gases poluentes e Gases de Efeito Estufa (GEE), congestionamentos e sinistros, deteriorando a qualidade de vida urbana [5][6].

O transporte urbano envolve o deslocamento de pessoas e mercadorias dentro de uma cidade por meios coletivos ou individuais [7], com destaque para o transporte de massa, que é mais eficiente e resulta em menores custos per capita e melhor serviço [8]. Os benefícios do transporte público urbano de massa também se associam às estratégias de desenvolvimento sustentável e do adensamento populacional, com destaque para o Desenvolvimento Orientado ao Transporte (DOT), que essencialmente integra aspectos de uso e ocupação do solo e mobilidade urbana, através de usos mistos, oferta de comércios e serviços e aumento da densidade urbana [9].

A interdependência entre o transporte de carga e o comércio eletrônico é clara, pois um transporte eficiente é vital para entregas rápidas e seguras aos consumidores [10]. O crescimento do e-commerce impulsionou o mercado de transporte de carga, exigindo serviços mais ágeis, seguros e competitivos.

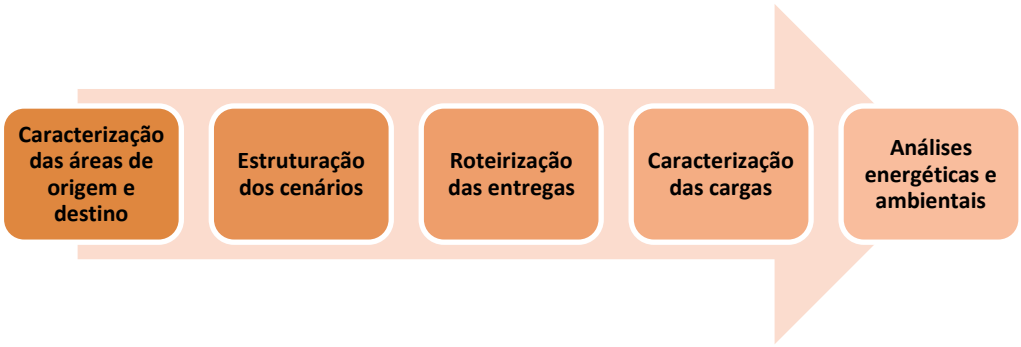
Estudos sugerem otimizar o transporte de carga com o transporte público, dividindo espaço nos trens entre passageiros e cargas ou utilizando vagões exclusivos [11]. Avaliar o potencial de sistemas metroviários e bondes para entregas na última milha mostra benefícios econômicos e sociais, além de reduzir custos operacionais e impactos ambientais comparados à entrega rodoviária [12][13]. Exemplos internacionais, como o Urban Consolidation Center, CarGo Tram em Dresden e CityCargo em Amsterdã, destacam a necessidade de integrar transporte de carga no planejamento urbano e a viabilidade de bondes de carga [14][15].

Este trabalho analisa o uso do sistema metroferroviário de São Paulo para a distribuição de mercadorias do comércio eletrônico como alternativa ao transporte por caminhões. Focando nos impactos ambientais, o objetivo é reduzir o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para um modelo de distribuição urbana mais sustentável e eficiente.

## MÉTODO

Este estudo utiliza uma abordagem de estudo de caso com elementos de simulação e análise comparativa de cenários para avaliar a viabilidade e os impactos do uso do sistema metroviário na distribuição urbana de mercadorias. A seguir, detalham-se as cinco etapas do método, conforme ilustrado na Figura 1.

**Figura 1: Fluxograma das etapas do método**

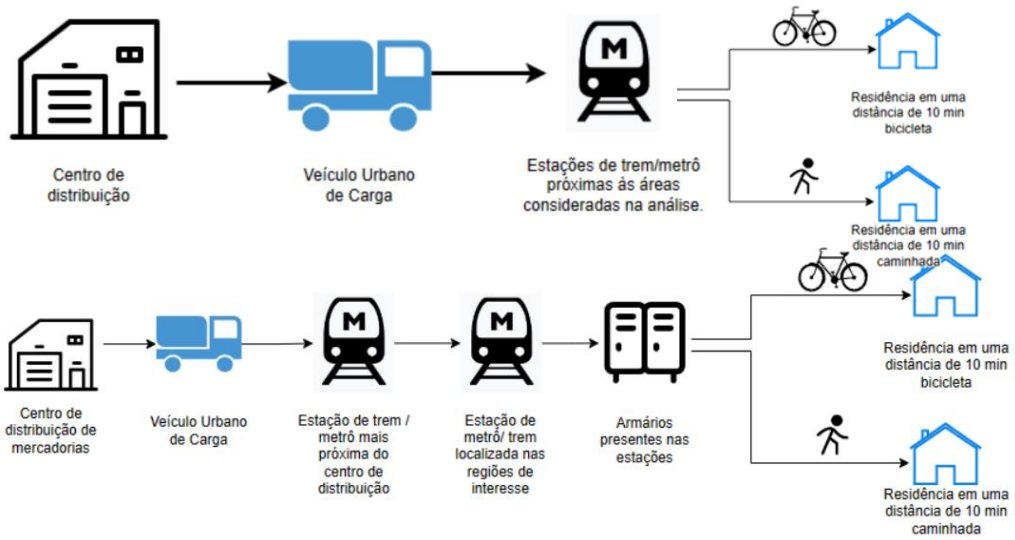



Fonte: os autores.

A **primeira etapa** caracteriza as áreas de origem e destino das viagens, definindo centros de distribuição (origem) e estações metroferroviárias (destino). Foram considerados dois perímetros em torno das estações como regiões de interesse: isócronas de 10 minutos de caminhada e de 10 minutos de bicicleta, com velocidades médias de 4,5 km/h e 20 km/h, respectivamente [16]. A análise utilizou setores censitários nesses perímetros para estimar a demanda de transporte de carga por operações espaciais no QGIS 3.28.

Na **segunda etapa** foram estruturados dois cenários para análise comparativa: controle e proposto. No cenário controle, a logística do e-commerce envolve caminhões movendo mercadorias de um centro de distribuição para uma estação de trem ou metrô próximas ao destino, refletindo a logística convencional do comércio eletrônico. No cenário proposto, um caminhão transporta mercadorias até a estação mais próxima do centro de distribuição, onde estas são transferidas para trens que seguem até a estação de destino. Nesse ponto, em ambos os cenários, os consumidores retiram as mercadorias de armários ou as recebem via um serviço de entrega por bicicleta. A estrutura dos cenários é ilustrada na Figura 2.

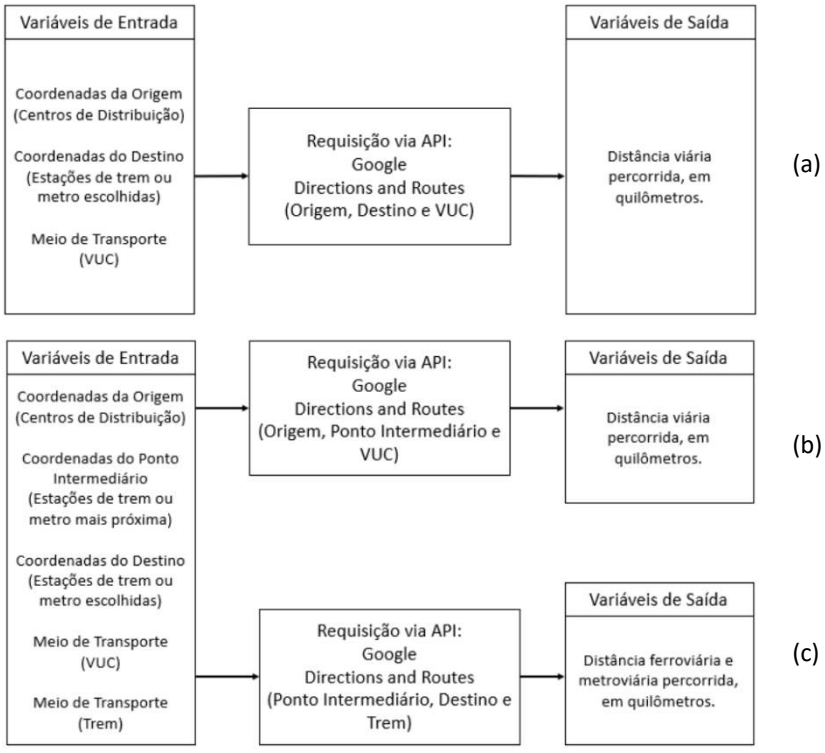
**Figura 2: Estruturação dos cenários controle (superior) e proposto (inferior)**




Fonte: os autores

A **terceira etapa** envolve a roteirização das entregas. Utiliza-se a linguagem de programação Python para converter as informações das etapas anteriores em dados manipuláveis por meio de um algoritmo personalizado (ver Figura 3). A partir das coordenadas de origem e destino, faz-se uma requisição via API para obter rotas e direções otimizadas, bem como calcula-se as distâncias viárias percorridas em quilômetros.

**Figura 3: Fluxograma do algoritmo para o cenário de controle (a) e para o cenário proposto utilizando o espaço ocioso do trem (b) e para um vagão dedicado (c)**




Fonte: os autores.

Na **quarta etapa** são caracterizadas as cargas transportadas, estimando o volume máximo de carga em um vagão de trem dedicado e o volume equivalente em veículos rodoviários para comparação dos cenários. Para determinar o volume máximo de carga transportável por um vagão, considera-se duas configurações: com e sem bancos, utilizando o palete PBR como unidade de medida, sem levar em conta a geometria específica do trem. No cenário proposto, um vagão dedicado ao transporte de cargas em cada trem foi considerado nos horários de menor movimento, garantindo o conforto dos passageiros. A densidade de passageiros variou conforme o tipo de veículo [17], sendo a capacidade máxima do metrô de São Paulo 6 pass/m² [18].

Na **quinta etapa**, os cenários controle e proposto são comparados em termos de gasto energético e emissões de $CO_2$. Com base nas distâncias percorridas e cargas transportadas, estima-se o consumo energético de combustível e as emissões de $CO_2$, considerando valores de consumo de combustível, fatores de emissão de $CO_2$ por litro e emissões de $CO_2$ por quilômetro, conforme mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1: Relação entre os modelos de veículos, consumo de combustível e fator de emissão**

| Modelo | Consumo Urbano (km/L) | Consumo ajustado (km/L) | Fator Emissão ($C0_2$/L) | Emissões ($C0_2$/km) |
|---|---|---|---|---|
| Fiat Fiorino (2023 Flex) | 8,1 (etanol) / 11,7 (gasolina) | 10,04 | 1,77 | 0,176 |
| Hyundai HR (2023 Diesel) | 9,0 | - | 3,20 | 0,356 |
| Fiat Mobi (2023 Flex) | 9,6 (etanol) / 13,5 (gasolina) | 11,71 | 1,77 | 0,151 |
| Mercedes Sprinter (2023 Diesel) | 10,3 | - | 3,20 | 0,311 |

Fonte: os autores, a partir de FIAT, E. A (2023), Hyundai (2023), Carvalho (2011), Mercedes-Benz (2023).

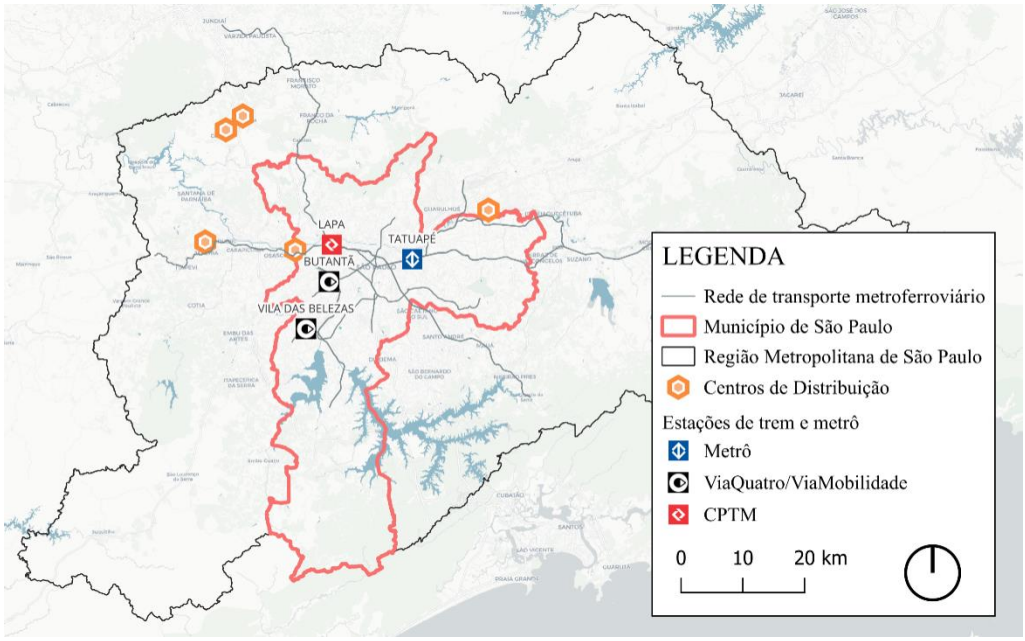
### ESTUDO DE CASO

Para aplicar o método, o Município de São Paulo foi escolhido como estudo de caso devido à sua extensa rede de transporte metroferroviária, composta por 13 linhas, 91 estações de metrô e 48 estações de trens suburbanos [19][20].

A análise do potencial de distribuição de mercadorias foi realizada em quatro áreas: Butantã, Lapa, Vila das Belezas e Tatuapé. Essas regiões foram selecionadas devido à presença de estações de trem ou metrô, à quantidade significativa de lotes urbanos residenciais e ao potencial para adensamento urbano. Além disso, as áreas de estudo possuem uma considerável presença de lotes residenciais e são incentivadas ao adensamento urbano de acordo com as diretrizes do Plano Diretor Estratégico (PDE) do município de São Paulo de 2014, revisado em 2023 [21].

Cinco Centros de Distribuição da rede do Mercado Livre também foram considerados como origens das viagens analisadas [22]. A visão geral das áreas de estudo é apresentada na Figura 4. Para caracterizar as áreas de estudo, utilizou-se dados da plataforma GeoSampa, que oferece informações sobre demografia, localização das estações, zoneamento, densidade populacional e logradouros no município de São Paulo [23].

**Figura 4: Visão geral das áreas selecionadas do estudo de caso**




Fonte: os autores.

## RESULTADOS

### CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS

Os primeiros resultados, referentes à caracterização das áreas, são apresentados na Tabela 2. Nota-se que a região da Vila das Belezas se destaca com o maior número total de pessoas, isto é, o total de habitantes, usuários da estação e da linha, chegando ao valor de 17.426.100 pessoas e indicando um alto potencial de demanda. Em segundo lugar, a região da Lapa também apresenta grande potencial, apesar de ter uma população residente menor, uma vez que possui muitos usuários da estação e da linha. As regiões do Butantã e do Tatuapé, com números menores de usuários, ainda representam números significativos de residentes localizados nos perímetros equivalentes a 10 minutos de caminhada e de bicicleta.

**Tabela 2: Resumo populacional e de usuários dos sistemas de transporte nos bairros de interesse**

| Região | Número de habitantes | Usuários da estação | Usuários da linha | População via caminhada | População via bicicleta | Potencial de Pessoas impactadas |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Butantã | 12.565 | 33.840 | 514.560 | 372 | 12.194 | 573.531 |
| Lapa | 15.583 | 670.900 | 9.208.600 | 359 | 15.224 | 9.910.666 |
| Vila das Belezas | 33.171 | 1.798.670 | 15.594.260 | 1.426 | 31.745 | 17.459.272 |
| Tatuapé | 27.133 | 12.750 | 479.940 | 419 | 26.714 | 546.956 |

Fonte: os autores.

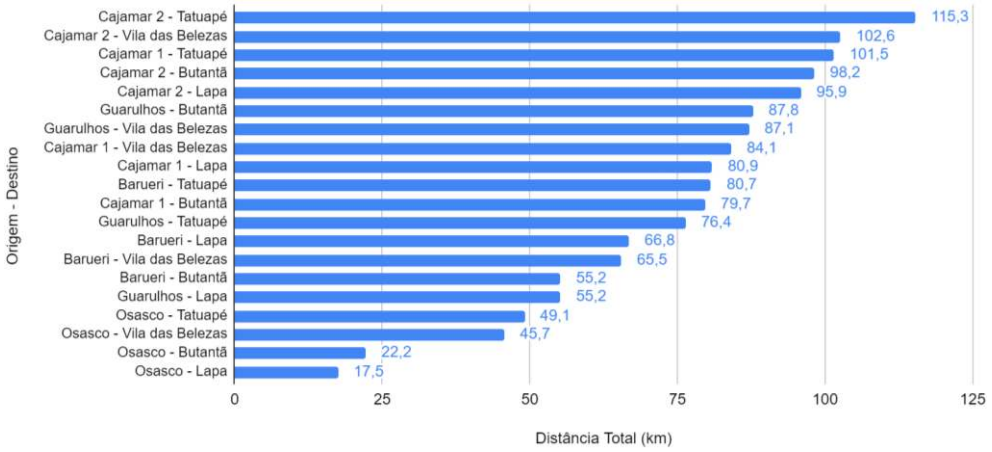
A análise das áreas de origem e destino das viagens revelou variações significativas na população e no número de usuários do transporte em cada região. As variações são

importantes para entender a demanda potencial para o serviço de transporte de mercadorias. Por exemplo, a Vila das Belezas, com um potencial de 17.459.272 pessoas impactadas, apresenta um alto potencial de demanda, o que indica que essa área poderia se beneficiar significativamente da implementação do serviço de transporte proposto. A inclusão das populações via caminhada e via bicicleta permite uma estimativa mais precisa da acessibilidade e da preferência dos usuários, influenciando diretamente a eficiência e a viabilidade do serviço logístico nas diferentes regiões.

### ROTEIRIZAÇÃO DAS ENTREGAS

A Figura 5 apresenta os resultados referentes à etapa de roteirização das entregas a partir dos centros de distribuição do Mercado Livre. Ao analisar os trajetos de ida e volta, observa-se que Cajamar 2 representa a origem mais distante, enquanto Osasco se destaca como a mais próxima dos destinos considerados.

**Figura 5: Distâncias percorridas por um caminhão na ida e volta, calculadas a partir de cada origem (centros de distribuição) para cada estação de transporte considerada**




Fonte: os autores.

Consequentemente, Osasco é definido como um limite inferior de proximidade, enquanto Cajamar 2 é considerado um limite superior de proximidade. Essa configuração sugere que as distâncias de todas as outras origens para quaisquer destinos estão contidas entre esses dois extremos.

Pode-se dizer que a origem mais distante, como Cajamar 2, implica em maiores custos operacionais e maior tempo de entrega, enquanto proximidades como Osasco reduzem esses custos e melhoram a eficiência. Assim, a roteirização das entregas baseada nessas distâncias não apenas otimiza o tempo e o custo, mas também se alinha aos objetivos de eficiência e sustentabilidade do estudo.

### CARACTERIZAÇÃO DAS CARGAS

O cálculo da área disponível para carga ($A_c$) e do volume de carga ($V_c$), considerou 6 carros por trem em dois casos:

- Caso 1: Capacidade de um vagão dedicado com assentos retirados;
- Caso 2: capacidade em um vagão dedicado com assentos mantidos.

Para o Caso 1, foram usadas informações da CPTM (2022) e do Metrô de São Paulo (2023), considerando a altura da porta de 2 metros, conforme Equações 1 e 2.

$$A_{c1} = \frac{1002\ passageiros}{6\frac{pass}{m^2}} = 167\ m^2 \quad \text{(Eq. 1)}$$

$$V_{c1} = \frac{A_{c1} * 2m}{6\ vagões} = \frac{167}{6} = 55{,}66\ m^3 \quad \text{(Eq. 2)}$$

Para o Caso 2, analogamente, conforme Equações 3 e 4:

$$A_{c2} = \frac{800\ passageiros}{6\frac{pass}{m^2}} = 133{,}33\ m^2 \quad \text{(Eq. 3)}$$

$$V_{c2} = \frac{A_{c2} * 2m}{6\ vagões} = \frac{133{,}33}{6} = 44{,}44\ m^3 \quad \text{(Eq. 4)}$$

As medidas padrão de um palete PBR são: lado maior 1.200 mm, lado menor 1.000 mm, altura 137 mm, e capacidade máxima de carga 1.200 kg [24].

A altura do empilhamento é limitada pela altura da porta do metrô subtraída da altura do palete, conforme Equação 5:

$$V_e = (2 - 0{,}137) * 1 * 1{,}2 = 2{,}24\ m^2 \quad \text{(Eq. 5)}$$

A capacidade de carga de cada configuração de vagão foi calculada dividindo o volume total disponível pelo volume de um palete, com os resultados consolidados na Tabela 3.

**Tabela 3: Volume calculado para transporte de carga em um vagão de trem dedicado**

| Configuração do vagão dedicado | Volume disponível [m³] | Quantidade de paletes | Volume carregado por paletes [m³] | Quantidade aproximada de pacotes de 0,001 m³ |
|---|---|---|---|---|
| Caso 1: Sem bancos | 55,66 | 24 | 53,76 | 53.760 |
| Caso 2: Com bancos | 44,44 | 19 | 42,56 | 42.560 |

Fonte: os autores.

A Tabela 4 mostra a quantidade de veículos rodoviários necessários para transportar a mesma carga de um vagão dedicado nos Casos 1 e 2. A capacidade de cada veículo foi baseada nas dimensões do palete, enquanto o volume de carga de cada vagão, em paletes, é detalhado na Tabela 3. Observa-se que o Fiat Mobi requer a maior quantidade de veículos e a Mercedes Sprinter, a menor.

**Tabela 4: Quantidade de veículos equivalente ao volume de carga de um vagão**

| Veículo | Caso 1: Vagão sem bancos | | Caso 2: Vagão com bancos | |
|---|---|---|---|---|
| | Quantidade de veículos equivalentes | Quantidade de pacotes | Quantidade de veículos equivalentes | Quantidade de pacotes |
| Fiat Fiorino | 17 | 56100 | 13 | 42900 |
| Fiat Mobi | 54 | 54000 | 43 | 43000 |
| Hyundai HR | 7 | 58100 | 6 | 49800 |
| Mercedes Sprinter | 4 | 53600 | 4 | 53600 |

Fonte: os autores.

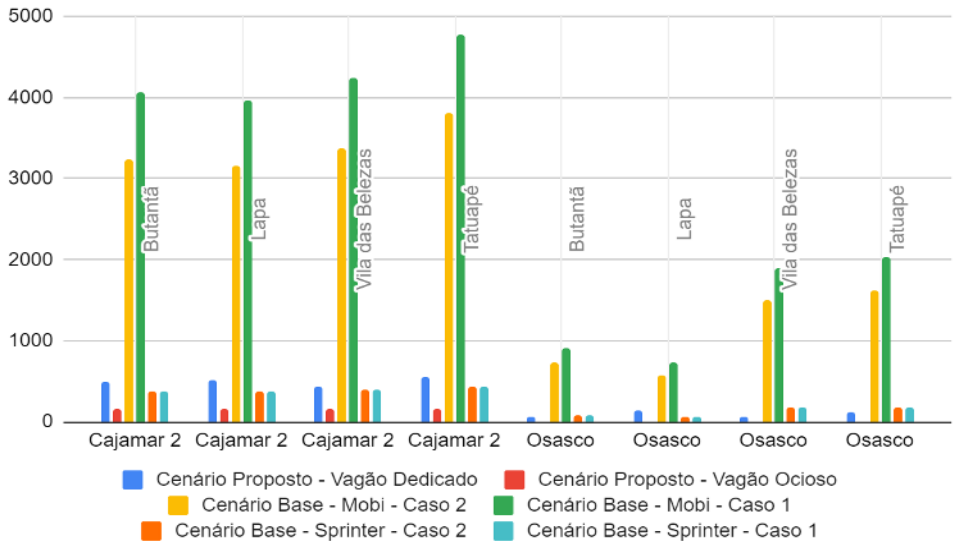
A capacidade de carga dos vagões, detalhada nas Tabelas 3 e 4, foi calculada considerando diferentes configurações, refletindo a flexibilidade necessária para adaptar o serviço às demandas variáveis das áreas caracterizadas. Comparar a capacidade de carga dos vagões com a demanda estimada nas áreas estudadas demonstra a complexidade do serviço proposto.

### Análises energéticas e ambientais

Os veículos analisados foram o Fiat Mobi, com menor capacidade, e a Mercedes Sprinter, com maior capacidade, conforme a Tabela 4. Para o vagão dedicado, a comparação limita-se ao Caso 1, assumindo um vagão dedicado projetado sem assentos. Para a utilização do espaço ocioso, a comparação se faz com o Caso 2, supondo mínimas adaptações nos vagões.

Foram considerados os dois estudos de caso situados em locais extremos: Osasco (mais próximo) e Cajamar 2 (mais distante). A Figura 6 apresenta o consumo energético, em kWh, de uma viagem, nos cenários controle e proposto. No cenário controle, variam os veículos utilizados, enquanto no proposto, usa-se um vagão dedicado ou ocioso para transporte. O cenário base compara o Fiat Mobi, o veículo com menor capacidade para entrega, e a Mercedes Sprinter, o com maior capacidade para entrega.

**Figura 6: Consumo energético, em kWh, para uma viagem do cenário controle e do cenário proposto, comparando as duas possibilidades de vagões com os veículos de menor (Fiat Mobi) e maior (Mercedes Sprinter) capacidade**




Fonte: os autores.

Conforme Figura 6, no cenário controle, o gasto energético do vagão dedicado (Caso 1) é 0,47 a 31,06 vezes menor, com a maior economia de 4.210,72 kWh no trajeto Cajamar 2 – Tatuapé, equivalente ao consumo residencial mensal de 74 pessoas [25]. Com o vagão ocioso (Caso 2), a economia é 2,42 a 183,65 vezes menor, com a maior economia de 3.647,22 kWh no trajeto Osasco – Tatuapé, equivalente ao consumo residencial mensal de 63 pessoas [25].

A tabela 5 consolida o consumo energético por quilograma de carga por quilômetro.

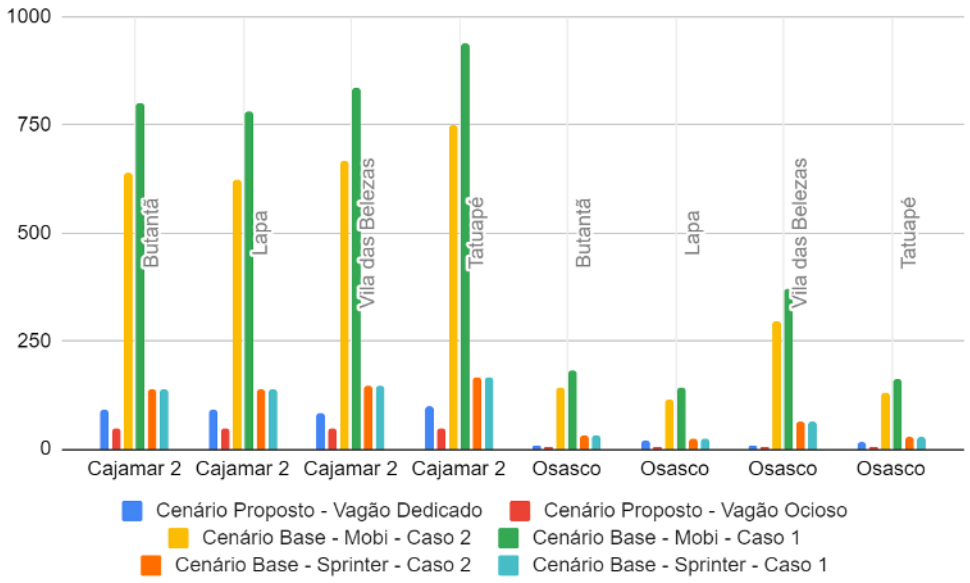
**Tabela 5: Gastos energéticos, em Wh/(kg de pacotes * km), referentes a uma viagem para transportar o volume de um vagão por tipo de transporte e cenário**

| Origem | Destino | Cenário Proposto: Vagão Dedicado | Cenário Proposto: Vagão Ocioso | Cenário Base – Mobi: Caso 2 | Cenário Base – Mobi: Caso 1 | Cenário Base – Sprinter: Caso 2 | Cenário Base – Sprinter: Caso 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cajamar 2 | Butantã | 0,06 | 0,02 | 0,77 | 0,77 | 0,07 | 0,07 |
| Cajamar 2 | Lapa | 0,06 | 0,02 | 0,77 | 0,77 | 0,07 | 0,07 |
| Cajamar 2 | Vila das Belezas | 0,06 | 0,03 | 0,77 | 0,77 | 0,07 | 0,07 |
| Cajamar 2 | Tatuapé | 0,06 | 0,02 | 0,77 | 0,77 | 0,07 | 0,07 |
| Osasco | Butantã | 0,05 | 0,01 | 0,77 | 0,77 | 0,07 | 0,07 |
| Osasco | Lapa | 0,05 | 0,00 | 0,77 | 0,77 | 0,07 | 0,07 |
| Osasco | Vila das Belezas | 0,05 | 0,01 | 0,77 | 0,77 | 0,07 | 0,07 |
| Osasco | Tatuapé | 0,05 | 0,00 | 0,77 | 0,77 | 0,07 | 0,07 |

Fonte: os autores.

As emissões de $CO_2$ mostram padrões semelhantes aos do consumo energético, variando significativamente entre os diferentes tipos de vagões e percursos.

**Figura 7: Emissões, em kg $CO_2$, para uma viagem do cenário controle e do cenário proposto, comparando as duas possibilidades de vagões com os veículos de menor (Fiat Mobi) e maior (Mercedes Sprinter) capacidade.**




Fonte: os autores.

Conforme a Figura 7, as emissões do vagão dedicado são consistentemente maiores do que as do vagão ocioso, com uma diferença de 1,82 a 6,49 vezes, alcançando até 48,38 kg de $CO_2$ por viagem. No Caso 1, o trajeto Osasco - Lapa emitiu 1,34 vezes menos $CO_2$ que as Sprinters, enquanto Osasco - Vila das Belezas reduziu 41,27 vezes em comparação aos Mobis. O trajeto mais impactante foi Cajamar 2 - Tatuapé, reduzindo 842,56 kg de $CO_2$. No Caso 2, o trajeto Cajamar 2 - Lapa pelo vagão ocioso emitiu 2,77 vezes menos $CO_2$ que as Sprinters, e Osasco - Vila das Belezas reduziu 103,82 vezes em comparação aos Mobis, com Cajamar 2 - Tatuapé evitando 699,43 kg de $CO_2$ por viagem. A Tabela 6 consolida a emissão de $CO_2$ por quilograma de carga por quilômetro, para os casos e cenários considerados.

**Tabela 6: Emissões, em kg de $CO_2$/(kg de pacotes * km), referentes a uma viagem para transportar o volume de um vagão por tipo de transporte e cenário**

| Origem | Destino | Cenário Proposto: Vagão Dedicado | Cenário Proposto: Vagão Ocioso | Cenário Base – Mobi: Caso 2 | Cenário Base – Mobi: Caso 1 | Cenário Base – Sprinter: Caso 2 | Cenário Base – Sprinter: Caso 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cajamar 2 | Butantã | 0,06 | 0,02 | 0,77 | 0,77 | 0,07 | 0,07 |
| Cajamar 2 | Lapa | 0,01 | 0,01 | 0,15 | 0,15 | 0,03 | 0,03 |
| Cajamar 2 | Vila das Belezas | 0,01 | 0,01 | 0,14 | 0,14 | 0,02 | 0,02 |
| Cajamar 2 | Tatuapé | 0,01 | 0,01 | 0,13 | 0,13 | 0,02 | 0,02 |
| Osasco | Butantã | 0,08 | 0,05 | 0,78 | 0,78 | 0,14 | 0,14 |
| Osasco | Lapa | 0,00 | 0,00 | 0,19 | 0,19 | 0,03 | 0,03 |
| Osasco | Vila das Belezas | 0,02 | 0,00 | 0,06 | 0,06 | 0,01 | 0,01 |
| Osasco | Tatuapé | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 0,14 | 0,02 | 0,02 |

Fonte: os autores.

Após equalizar a ocupação volumétrica dos veículos de carga, o cenário proposto emergiu como uma opção mais sustentável em termos energéticos e de emissões. O uso de um vagão dedicado mostrou resultados energéticos semelhantes ao cenário controle com o VUC Sprinter, com variações marginais. No entanto, o cenário que aproveita o espaço ocioso de um vagão para transporte de carga provou ser extremamente eficiente, consumindo até 21,35 vezes menos energia que a Sprinter e 183,65 vezes menos que o Mobi. A maior economia foi no trajeto Cajamar 2 - Tatuapé, com uma redução de 3,65 MWh por viagem, e evitou a emissão de 616,97 kg de $CO_2$ entre Cajamar 2 e Vila das Belezas.

As tabelas 5 e 6 mostram que o cenário base com o Fiat Mobi é o mais custoso em termos de consumo energético e emissões de $CO_2$, enquanto o cenário com o vagão ocioso tem o menor consumo energético e a menor emissão de $CO_2$ por pacote por quilômetro. O cenário com o vagão dedicado é a segunda opção menos custosa energeticamente, mas suas emissões são comparáveis às do cenário com o Sprinter em certas rotas.

A comparação dos dois cenários propostos indica que o uso de um vagão ocioso é a opção mais eficiente e menos poluente, otimizando um veículo já em operação. Em contraste, o vagão dedicado é viável apenas como substituto de uma frota de Mobis, com consumo energético e emissões de $CO_2$ superiores aos do uso de Sprinters.

Em todas as análises, o Fiat Mobi se destacou como a pior escolha para entregas em termos energéticos e de emissões. O cenário que usa um vagão ocioso mostrou ser a alternativa mais eficiente e ambientalmente favorável.

Por fim, pode-se dizer que os resultados do estudo em São Paulo são consistentes com as experiências internacionais. Assim como a experiência CarGo Tram e City Cargo [14][15], o trabalho também identificou a redução do consumo de energia e de emissões de GEE, demonstrando que a integração de sistemas metroferroviários na logística do e-commerce pode ser uma solução eficiente e sustentável, em especial se associadas às políticas de adensamento populacional e às legislações urbanas, com destaque ao PDE do município de São Paulo [21].

## CONCLUSÃO

O estudo abordou uma lacuna crítica identificada anteriormente: a urgente necessidade de alternativas sustentáveis para a distribuição de carga em áreas urbanas.

A utilização de vagões ociosos de trem e metrô para o transporte de cargas, otimizando o espaço disponível, foi destacada como a alternativa mais eficiente entre as analisadas. Por outro lado, a implementação de vagões dedicados mostrou-se competitiva em certos trajetos. Contudo, uma implementação desta alternativa em toda a rede de estações de transporte seria necessária para alcançar um impacto ambiental significativo.

O estudo enfrentou desafios significativos, especialmente em relação à disponibilidade e atualidade dos dados. A análise populacional baseou-se em dados do Censo de 2010, que eram os disponíveis quando da realização da pesquisa. Adicionalmente, a restrição no acesso a dados sensíveis de empresas de transporte de mercadorias exigiu que inferências fossem feitas ao longo da pesquisa.

A análise se concentrou nas emissões de GEE e no consumo energético. Assim, é essencial destacar que a implementação da proposta requer uma avaliação mais abrangente, incluindo perspectivas ambientais e econômicas mais amplas, além de aspectos sociais. Além disso, as estimativas de capacidade de carga partiram de aproximações geométricas que podem não refletir a real capacidade dos vagões.

Para pesquisas futuras, recomenda-se a inclusão de aspectos logísticos, operacionais, financeiros e de infraestrutura ainda não explorados. Entre esses aspectos, destaca-se a necessidade de avaliar potenciais reformas estruturais nas estações, adaptar a rotina operacional dos trens e metrôs para incluir vagões de carga, estudar os impactos na circulação e no transporte de passageiros e analisar os custos e benefícios sociais e econômicos associados a essa alternativa.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa produtividade em pesquisa.

## REFERÊNCIAS

[1] ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS [ONU]. **ONU: mais de 70% da população mundial viverá em cidades até 2050**. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/62293-onu-mais-de-70-da-populacao-mundial-vivera-em-cidades-ate-2050. Acesso em: 13 maio 2024.

[2] ANUÁRIO CNT DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas**. Brasília, 2022. Disponível em: https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/. Acesso em 20 fevereiro 2024.

[3] DE MELO CRUZ, Wander Luis. Crescimento do e-commerce no Brasil: desenvolvimento, serviços logísticos e o impulso da pandemia de Covid-19. **GeoTextos**, 2021.

[4] ESCURSELL, Sílvia; LLORACH-MASSANA, Pere; RONCERO, M. Blanca. Sustainability in e-commerce packaging: A review. **Journal of cleaner production**, v. 280, p. 124314, 2021.

[5] GOMES, A. C., DE LIMA JUNIOR, F. B., SOLIANI, R. D., DE SOUZA OLIVEIRA, P. R., DE OLIVEIRA, D. A., SIQUEIRA, R. M., MACÊDO, J. J. S. Logistics management in e-commerce: challenges and opportunities. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 14, n. 5, p.

[6] EVANS, J. E. et al. Transit oriented development. **Transit Cooperative Research Program (TCRP) Report**, v. 95, 2007.

[7] CENTRO DE ENSINO E PESQUISA APLICADA [CEPA]. **Transporte Urbano**. Disponível em: http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo4A/urbano.htm Acesso em 28 nov. 2023.

[8] MONTMORENCY, T. et al. **PLANEJAMENTO URBANO E TRANSPORTE URBANO DE CARGA: INVESTIGAÇÃO DE MODELOS DE INTEGRAÇÃO E APLICAÇÃO DO MODELO**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-

24082016-082153/publico/ThiagoCanhosMontmorencySilvaCorr16.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2024.

[9] SUZUKI, H.; CERVERO, R.; IUCHI, K. **Transforming cities with transit: Transit and land-use integration for sustainable urban development**. World Bank Publications, 2013.

[10] LEONARDO, R.; FUERTH. **O e-commerce e a integração logística no transporte de carga expressa.** Disponível em: https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos07/1364_Artigo_SEGET.pdf. Acesso em: 24 jun. 2023.

[11] HESSE, M. City logistics. network modelling and intelligent transport systems. **Journal of Transport Geography**, v. 10, p. 158-159, 2002.

[12] VILLA, R.; MONZÓN, A. A Metro-Based System as Sustainable Alternative for Urban Logistics in the Era of E-Commerce. **Sustainability**, v. 13, n. 8, p. 4479, 16 abr. 2021.

[13] DE LANGHE, K. et al. **How to make urban freight transport by tram successful?** Journal of Shipping and Trade, v. 4, n. 1, dez. 2019.

[14] CUI, Jianqiang; DODSON, Jago; HALL, Peter V. **Planning for urban freight transport: An overview.** Transport Reviews, v. 35, n. 5, p. 583-598, 2015.

[15] PIETRZAK, O.; PIETRZAK, K**.** Cargo tram in freight handling in urban areas in Poland. **Sustainable Cities and Society**, v. 70, p. 102902, jul. 2021.

[16] BOARNET, Marlon G.; COMPIN, Nicholas S. Transit-oriented development in San Diego County: The incremental implementation of a planning idea. **Journal of the American Planning Association**, v. 65, n. 1, p. 80-95, 1999.

[17] COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO [METRO]. **Características – Metrô**. Disponível em: https://www.metro.sp.gov.br/pt_BR/obras/linha-15-prata/caracteristicas#:~:text=Largura%20das%20portas%3A%201%2C600%20mm. Acesso em: 18 nov. 2023.

[18] CHAUAR, G. T. B. Conceito de Nível de Serviço para Avaliação de Transporte Público. **Notas Técnicas. São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego (CET)**, 1979.

[19] COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO [METRO]. **Institucional – Metrô**. Disponível em: https://www.metro.sp.gov.br/metro/institucional/#:~:text=A%20rede%20metrovi%C3%A1ria%20da%20cidade. Acesso em: 30 maio 2024.

[20] GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa dos Transportes Metropolitanos.** Secretaria dos Transportes Metropolitanos. Disponível em: https://www.stm.sp.gov.br/. Acesso em 28 maio 2024.

[21] PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO [PMSP]. Lei nº 17.975 de 8 de julho de 2023. Dispõe sobre a revisão intermediária do Plano Diretor Estratégico do Município de São Paulo. **Diário Oficial da Cidade de São Paulo**, São Paulo.

[22] COUTO, M. **Centro de distribuição Mercado Livre: o que é, onde fica e como funciona?** Disponível em: https://www.nuvemshop.com.br/blog/centro-de-distribuicao-mercado-livre/. Acesso em: 24 jun. 2023.

[23] GESTÃO URBANA. Prefeitura do Município de São Paulo. **Plataforma GeoSampa.** Disponível em: https://gestaourbana.prefeitura.sp.gov.br/noticias/geosampa-veja-a-cidade-de-sao-paulo-em-3d/. Acesso em: 30 maio 2024.

[24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SUPERMERCADOS [ABRAS]. **Palete PBR-1 Versão 2019**. ABRAS. Disponível em: https://www.abras.com.br/palete-pbr/palete-pbr-1-versao-2019. Acesso em: 30 maio 2024.

[25] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA [EPE]. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022**. Brasília, 2022 Disponível em: https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro/. Acesso em: 27 novembro 2023.