



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS
CATEGORIA (1)

MODELAGEM CONCEITUAL E MATEMÁTICA PARA A
ANÁLISE TOPOLÓGICA DE REDES DE TRANSPORTE
METROVIÁRIO COM BASE NA DEMANDA DO USUÁRIO



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

1 INTRODUÇÃO

O planejamento de redes de transporte metroviário em metrópoles consolidadas ocorre, em geral, sob restrição fiscal e sob a pressão de demandas sociais acumuladas historicamente. A decisão de implantar um novo eixo de alta capacidade deixou de ser justificável apenas pelo crescimento projetado de passageiros: passa a requerer uma avaliação sistêmica que pondere tempo de viagem, confiabilidade, resiliência a falhas e efeitos distributivos sobre a acessibilidade urbana. Esse deslocamento de critério — do volume agregado para o desempenho da rede como um todo — é o ponto de partida deste trabalho.

A Região Leste de São Paulo exemplifica o problema com nitidez. Concentra elevada densidade populacional e gera cerca de 2,47 milhões de viagens/dia, mas convive com menor disponibilidade relativa de infraestrutura de transporte de alta capacidade e forte predominância do transporte individual (em torno de 55,4% da divisão modal), o que se traduz em tempos elevados de deslocamento devido a esta sobrecarga, à concentração dos fluxos nos principais eixos radiais e à predominância de áreas residenciais majoritariamente de menor renda localizadas a maiores distâncias dos principais polos de emprego e serviços. Nesse contexto, a hipótese recorrente de concorrência entre linhas pode ser analisada à luz da teoria de redes complexas, segundo a qual a redundância e redistribuição de fluxos tendem a elevar o desempenho global do sistema, em vez de simplesmente deslocar ou reduzir a demanda existente.

1.1 Contexto na literatura:

A representação de sistemas de transporte como grafos é consolidada e oferece um arcabouço quantitativo maduro com ferramentas quantitativas para análise de redes. A revisão de (LIN; BAN, 2013) sistematiza diferentes formas de representação (planar/não-planar, primal/dual, espaços L e P), bem como métricas topológicas (grau, *betweenness*, proximidade, eficiência e *information centrality*) aplicáveis a redes



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

ferroviárias, de transporte público urbano, aéreas, marítimas e viárias. Esse corpo teórico fornece os instrumentos para mensurar concentração de fluxo em pontos críticos, desempenho global de conectividade e robustez frente a interrupções. O presente trabalho não revisa exaustivamente esse campo, mas seleciona dele o subconjunto pertinente ao problema de otimização topológica orientada à demanda, a ser detalhado na Seção 2.1.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral é propor um novo eixo estruturante na Zona Leste de São Paulo, a partir da modelagem conceitual e matemática de um problema de otimização topológica de redes metroviárias que incorpore explicitamente a demanda do usuário. Como objetivos específicos: (i) delimitar, na literatura de redes complexas, o escopo teórico estritamente necessário ao problema; (ii) explicitar o papel do usuário como elemento que pondera e valida as métricas topológicas; (iii) caracterizar as limitações de dados e de APIs que condicionam a modelagem; (iv) formalizar os requisitos de software de um modelo computacional a ser implementado em Python e MATLAB; e (v) preparar o terreno para a formulação matemática do problema de otimização e suas aplicações; (vi) demonstrar a melhoria do sistema como rede em alternativa às linhas isoladas; (vii) quantificar os ganhos socioeconômicos potenciais.

Como o problema será resolvido: a estratégia adotada parte da representação do sistema como grafo ponderado, calibrado pela OD 2023, e da simulação de alocação de fluxos por caminhos de menor custo (tempo). Sobre essa base, aplicam-se métricas topológicas para diagnosticar a rede atual e avaliar cenários de expansão. A modelagem do usuário entra como camada que traduz padrões de viagem observados em pesos e restrições do grafo, de modo que a otimização topológica resultante não seja puramente geométrica, mas orientada ao comportamento real de deslocamento. O fluxo completo



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

— da coleta de dados à recomendação de traçado — é descrito na metodologia (Seção 3) e formalizado no modelo matemático (Seção 4).

3 ANÁLISE COMPARATIVA, E PROPOSIÇÃO DE INFRAESTRUTURA METROVIÁRIA PARA A REGIÃO LESTE DA RMSP

A alteração da configuração recente nos padrões de mobilidade na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), evidenciada pela Pesquisa Origem e Destino 2023, indica uma redução no volume global de viagens e uma alteração qualitativa na dinâmica dos deslocamentos urbanos. Diante deste cenário, reforça-se a necessidade de avaliar os critérios tradicionais de planejamento de transportes, historicamente baseados na expansão contínua da demanda de passageiros, considerando seus impactos sobre a conectividade, acessibilidade e desempenho globalmente.

A literatura contemporânea aponta que, em cenários de mobilidade estagnada ou reduzida, os deslocamentos remanescentes concentram-se em atividades essenciais, como trabalho e educação, aumentando a importância de sistemas de transporte estruturantes (METRO, 2023).

A recuperação da mobilidade observada no período pós-pandemia tem sido acompanhada por transformações nos padrões de deslocamento dos usuários, incluindo maior flexibilização das viagens relacionadas ao trabalho, alterações na escolha modal e mudanças na distribuição temporal das demandas, fatores que devem ser considerados no planejamento e na expansão das redes de transporte (CHRISTIDIS et al., 2021).

Dessa forma, a definição de prioridades de investimento deve considerar não apenas o volume de viagens, mas também a relação entre demanda, eficiência operacional e distribuição territorial da demanda. A Região Leste de São Paulo se destaca nesse



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

cenário, dada sua elevada concentração populacional, forte dependência de deslocamentos de longa distância e menor disponibilidade relativa de infraestrutura.

A Região Leste apresenta aproximadamente 2,47 milhões de viagens diárias, configurando-se como um dos principais polos emissores de deslocamentos da RMSP (METRO, 2023). Esse volume reforça sua relevância para o sistema metropolitano de transportes.

Entretanto, a análise da divisão modal revela predominância do transporte individual (55,4%), evidenciando limitações na oferta de transporte coletivo e potencial para sua expansão. Esse padrão contrasta com outras regiões mais bem estruturadas, onde o transporte coletivo apresenta maior participação.

A comparação entre outras regiões demonstra que a Zona Leste reúne uma condição singular:

- elevada densidade populacional;
- grande volume de viagens;
- baixa participação relativa do transporte coletivo.

Tal combinação caracteriza um cenário de alta prioridade para investimentos em infraestrutura de alta capacidade, especialmente sistemas metroferroviários.

Neste quadro, feito a partir de dados da Pesquisa OD 2023, nota-se a queda no número total de viagens na RMSP, em contraste ao crescimento no número de viagens na Zona Leste, tanto como Origem de Demandas como em Viagens Internas à Região.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 1 – Tabela 1 – Quantidade de viagens na Zona Leste e total da RMSP (2017–2023) Fonte: elaboração própria com base em METRÔ (2023).

Zona Leste	2017	2023
Quantidade de Viagens Originadas em Transporte Coletivo	691.000	674.000
Quantidade de Viagens Originadas em Transporte Individual	722.000	838.000
Quantidade de Viagens Internas em Transporte Coletivo	498.000	500.000
Quantidade de Viagens Internas em Transporte Individual	629.000	734.000
Quantidade Total de Viagens Originadas em Transporte Coletivo	15.295.000	12.264.000
Quantidade Total de Viagens Originadas em Transporte Individual	12.985.000	12.869.000



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

DENSIDADE DE POPULAÇÃO POR ZONA OD 2023

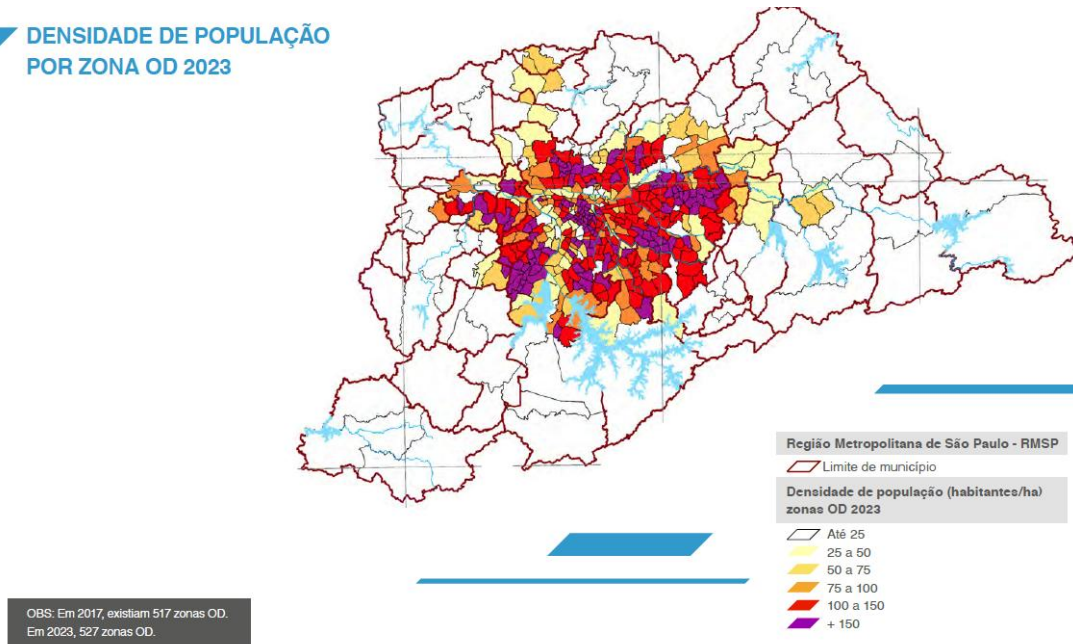


Figura 1 – Densidade populacional Fonte: elaboração própria a partir da Pesquisa OD 2023 (METRÔ, 2023).

DENSIDADE DE EMPREGOS POR ZONA OD 2023

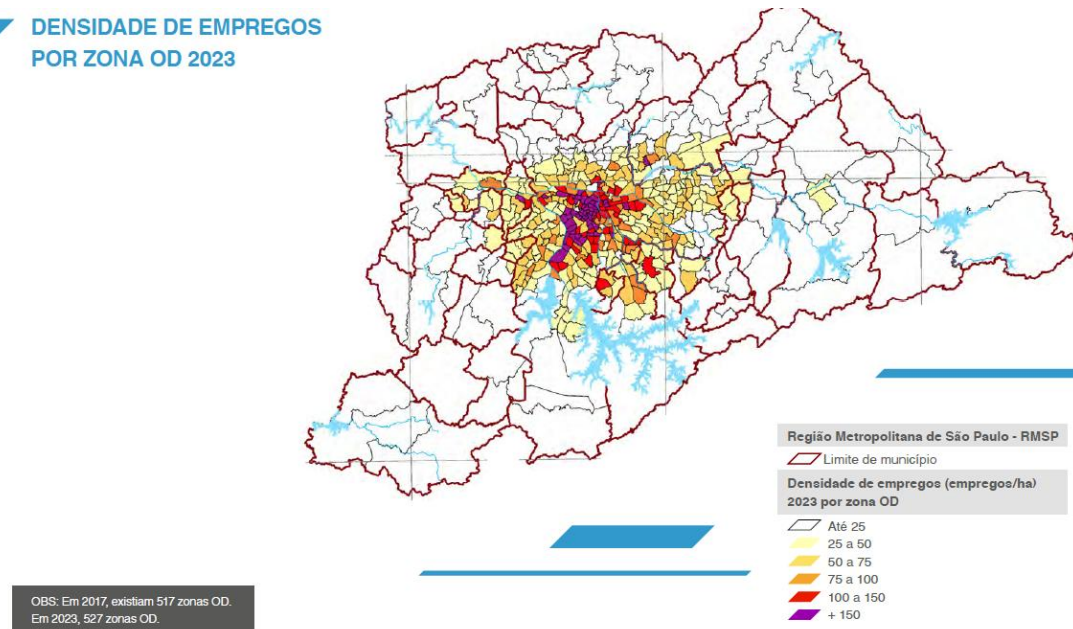


Figura 2 – Densidade de empregos por zona. Fonte: elaboração própria a partir da Pesquisa OD 2023 (METRÔ, 2023)



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A configuração urbana da Zona Leste de São Paulo está diretamente associada ao processo histórico de urbanização da cidade, no qual a partir da primeira metade do século XX, pode ser observada a consolidação da área com expansão periférica, caracterizada pela ocupação por populações de baixa renda (OLIVEIRA, 2016).

Esse processo seguiu um padrão de urbanização radial-concêntrico, no qual:

- áreas centrais concentram investimentos e infraestrutura;
- periferias apresentam predominância de ocupações de menor renda e menor acesso relativo a serviços (CASTELLS, 1983).

Segundo Hughes (2004), esse modelo promoveu a segregação socioespacial, entendida neste trabalho como a concentração de populações de menor renda em áreas mais distantes dos principais polos de emprego e serviços, dificultando o acesso às oportunidades urbanas.

A literatura propõe que a consolidação das periferias urbanas não resulta apenas de ausência de planejamento, mas de processos históricos, econômicos e institucionais que influenciaram a ocupação e o desenvolvimento urbano (TORRES, 2025).

Na Zona Leste, políticas habitacionais implementadas em áreas periféricas, associadas a sistemas de transporte majoritariamente voltados ao deslocamento pendular, contribuíram para reforçar a segregação socioespacial, em detrimento da integração urbana.

Essas características territoriais são relevantes para este estudo porque influenciam diretamente a distribuição espacial da demanda e os padrões de deslocamento considerados na modelagem da rede.

Esse padrão evidencia que a distribuição de infraestrutura urbana ocorreu de forma desigual entre as diferentes regiões da metrópole, refletindo distintas trajetórias de ocupação e desenvolvimento urbano.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A infraestrutura de mobilidade desempenhou papel fundamental na estruturação da dinâmica urbana. Segundo Santos (1993), os sistemas de transporte estruturam o uso do território e influenciam diretamente a organização social do espaço urbano.

No caso da RMSP, observa-se que:

- a população periférica enfrenta maiores tempos de deslocamento;
- há menor oferta de transporte de alta capacidade;
- os custos relativos da mobilidade são mais elevados.

Segundo Logiodice e Giannotti (2025), esse cenário configura diferenças nas condições de acesso ao sistema de transportes, nos quais populações de baixa renda enfrentam maiores dificuldades de deslocamento.

4 PROPOSIÇÃO DE TRAÇADOS A PARTIR DA DEMANDA

A demanda por novas conexões de transporte de alta capacidade na Zona Leste tem motivado a proposição de diferentes projetos de expansão da rede metroviária nos últimos anos. A análise dessas iniciativas é útil para contextualizar as alternativas atualmente consideradas para a região e discutir seus possíveis efeitos sobre o desempenho e a conectividade da rede. Com esse objetivo, são apresentados a seguir alguns dos principais projetos previstos ou em estudo para a região.

As informações relativas às linhas consideradas neste estudo foram extraídas de dados públicos amplamente divulgados, complementados por fontes técnicas especializadas do setor metroferroviário de grande circulação.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

4.1 Linha 16

A Linha 16 representa o principal projeto contemporâneo de conexão transversal entre a Zona Leste e a Zona Oeste, com extensão prevista de até 32 km e demanda estimada de até 850 mil passageiros por dia.

Esse projeto rompe com a lógica radial da rede, promovendo maior integração entre regiões e reduzindo a dependência da Linha 3–Vermelha (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2025).

Entretanto, o histórico de revisões de traçado demonstra que diferentes alternativas vêm sendo avaliadas ao longo do desenvolvimento do projeto. Na demonstração do traçado abaixo, observa-se uma preocupação recorrente relacionada à distribuição da demanda entre a linha 16 e a linha 6, conforme apontado pelo site MetrôCPTM, em matéria do dia 24/08/2024, no qual cita: “A sugestão de traçado feita pela Acciona também afasta a Linha 16 da Linha 6 após a estação São Carlos/Parque da Mooca, onde ambas se encontrarão.”





Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

4.2 Expansão da Linha 2–Verde

A expansão da Linha 2 constitui a principal intervenção atualmente em implantação na Zona Leste, conectando áreas densas como Anália Franco e Penha à região central com acessos importantes como a Avenida Paulista.

Embora não tenha sido concebida para atender diretamente as áreas extremamente periféricas da região, a expansão produz ganhos relevantes para a rede como um todo (METRÔ, 2025). O principal benefício, neste caso, é o reforço do conceito de operação em rede, por meio da criação de redundâncias e de novas alternativas para mobilidade.

Com a implantação da estação Penha Linha 2 – Verde, será criado um ponto de conexão com a Linha 3 - vermelha, atualmente o corredor de maior demanda da rede. Isso permitirá de forma mais equilibrada uma distribuição dos passageiros ao se dispersar entre as linhas 2 e 3, a depender do destino final ou da disponibilidade do sistema à frente, fatos que impactam diretamente no tempo de viagem e na qualidade de vida dos usuários.

Desta forma, observa-se um melhor desempenho da rede como um todo, decorrente da ampliação das alternativas de deslocamento e da redistribuição dos fluxos de passageiros.





Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

4.3 Linha 15–Prata

A Linha 15–Prata, em monotrilho, conecta Vila Prudente a São Mateus e representa uma importante ampliação da oferta de transporte de média capacidade na Zona Leste.

Embora apresente características operacionais e capacidades distintas das linhas convencionais de metrô sua implantação ampliou a conectividade da região e criou alternativas de deslocamento para os usuários.

Entre suas vantagens destacam-se a menor necessidade de desapropriações, a maior flexibilidade para implantação em traçados com curvas e rampas acentuadas e a reduzida ocupação do espaço urbano quando comparada a outras soluções de transporte sobre trilhos.

Além disso, por operar em via segregada elevada, o sistema reduz interferências com o tráfego viário e amplia a confiabilidade operacional do corredor.

A linha ampliou as alternativas de deslocamento para os usuários da região e permanece em processo de expansão, com potencial para aumentar ainda mais sua conectividade com o restante da rede.



4.4 Linha 14

A Linha 14 pode ser compreendida como um eixo transversal estruturante, concebido para interligar as regiões do ABC, a Zona Leste e Guarulhos sem a necessidade de passagem pelo centro de São Paulo. Essa configuração rompe com a lógica radial



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



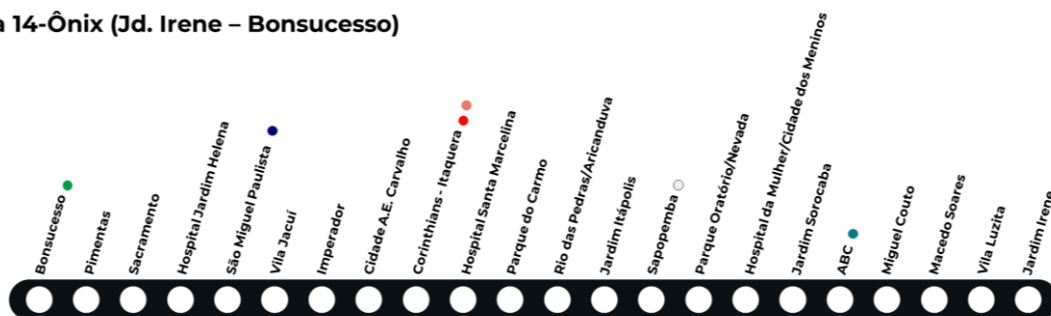
32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

existente, permitindo redistribuir fluxos e reduzir a sobrecarga em estações como Brás e Tatuapé criando possibilidades de deslocamento alternativo.

O traçado se apoia em múltiplas integrações com as linhas 10, 11, 12 e 13, funcionando como um corredor de articulação entre eixos já consolidados. Isso tenderia a favorecer a dispersão das transferências, reduzindo tempos de viagem e atendendo uma faixa contínua de alta densidade urbana, com forte potencial de reestruturação territorial e desenvolvimento orientado ao transporte.

Do ponto de vista técnico, o uso previsto de VLT indica uma solução de capacidade intermediária para um corredor com papel sistêmico relevante, o que merece avaliação detalhada da compatibilidade entre a capacidade ofertada e a demanda futura do trecho. Ainda em fase de estudos, o projeto mantém incertezas quanto ao traçado definitivo e ao desempenho operacional, mas se destaca como um componente estratégico para ampliar a conectividade transversal e reduzir a centralidade excessiva da rede metropolitana (GUALBERTO, 2024).

Linha 14-Ônix (Jd. Irene – Bonsucesso)



4.5 Linhas previstas no PITU

O Plano Integrado de Transportes Urbanos - PITU 2040 também previu linhas estruturantes com impacto na Zona Leste, como:

- Linha 23;
- Linha 25.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Essas propostas indicam reconhecimento técnico da demanda e necessidade de alternativas para as linhas radiais já saturadas, porém ainda sem materialização em projetos executivos (METRÔ, 2020).



Figura 3 – Configuração das linhas propostas para 2040 Fonte: adaptado de METRÔ (2020).



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: INDICADORES DE ANÁLISE TOPOLÓGICA

A análise adota a representação de sistemas de transporte como grafos, abordagem consolidada na literatura, como o visto em Barthélemy (2011), de redes complexas e já aplicada a sistemas metroviários reais, como o metrô da Cidade do México (SHIRAI et al., 2019). Um sistema metroferroviário é descrito por um grafo $G = (N, E)$, em que N é o conjunto de nós (estações) e E o de arestas (conexões operacionais), eventualmente ponderadas por distância, tempo ou fluxo. Adotam-se duas representações complementares (SEN, P. et al., 2003): o *L-space* A , em que duas estações são conectadas se consecutivas em uma mesma linha (preserva a conectividade física), e o *P-space*, em que todas as estações de uma linha formam um subgrafo completo, de modo que o comprimento de caminho passa a medir o número de transbordos.

A seguir, definem-se os indicadores efetivamente utilizados neste trabalho. Sejam a_{ij} o elemento da matriz de adjacência (1 se há aresta entre i e j , 0 caso contrário), w_{ij} o peso da aresta e d_{ij} a distância do caminho mínimo entre i e j .

Centralidade de grau. Número de conexões diretas de um nó (FREEMAN, 1977); identifica concentração estrutural:

$$k_i = \sum_{j \in N} a_{ij}. \quad (1)$$

Em redes ponderadas, define-se analogamente a força do nó, $s_i = \sum_j w_{ij}$

Centralidade de intermediação (*betweenness*). Mede o quanto um nó participa dos caminhos mínimos entre pares de estações, de acordo com o conceito adaptado de FREEMAN; nós de alta intermediação concentram fluxo e são críticos para a segurança operacional (DERRIBLE, S.; KENNEDY, C., 2010)



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

$$C_i^B = \sum_{j \neq g \neq i} \frac{n_{jg}(i)}{n_{jg}}, \quad (2)$$

onde n_{jg} é o número de caminhos mínimos entre j e g e $n_{jg}(i)$ o número desses caminhos que passam por i .

Centralidade de proximidade (*closeness*). Quantifica quão próximo um nó está de todos os demais da rede (FREEMAN, 1979):

$$C_i^C = \frac{1}{\sum_{j \neq i} d_{ij}}. \quad (3)$$

Comprimento característico. Propriedade global que reflete a separação interna média da rede, sendo amplamente utilizada na caracterização da eficiência estrutural de redes complexas (BARTHÉLEMY, 2011):

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}. \quad (4)$$

Eficiência de rede (E). Proposta por Latora e Marchiori (2001), mede o desempenho global de comunicação pelo inverso das distâncias, evitando a divergência de Equação (4) em grafos desconexos:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}. \quad (5)$$



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Centralidade da Informação (*Information centrality*). Também de Latora e Marchiori (2007), quantifica a robustez pela queda relativa de eficiência ao remover o nó i e suas arestas, sendo o instrumento direto para priorizar intervenções e avaliar vulnerabilidade:

$$C_i^I = \frac{E(G) - E(G \setminus i)}{E(G)}. \quad (6)$$

Coefficiente de Aglomeração (*clustering*). Probabilidade de que dois vizinhos de um nó estejam também conectados WATTS et al. (1998), com m_i arestas entre os k_i vizinhos de i

$$c_i = \frac{2 m_i}{k_i(k_i - 1)}. \quad (7)$$

Índices de conectividade. Da análise clássica de redes de transportes (RODRIGUE, 2020), com $|E|$ arestas e N nós: o índice α (*meshedness*) mede a presença de circuitos; β , a conectividade média; e γ , a razão entre arestas existentes e possíveis:

$$\alpha = \frac{|E| - N + 1}{2N - 5}, \quad \beta = \frac{|E|}{N}, \quad \gamma = \frac{|E|}{3(N - 2)}. \quad (8)$$

Ponderações e orientação à demanda. Cada métrica é avaliada em três regimes: topológico ($w_{ij} = 1$), ponderado por distância geográfica (w_{ij} em km) e orientado à



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

demanda. Neste último, os pares origem–destino são ponderados pela demanda da OD 2023, o que aproxima os caminhos mínimos das escolhas reais de deslocamento e é coerente com a literatura que enfatiza o acoplamento entre a estrutura topológica das redes e os padrões efetivos de utilização pelos usuários (CRUCITTI; LATORA; PORTA, 2006; LIN; BAN, 2013). Define-se ainda a acessibilidade populacional de um nó como $A_I = \sum_{j \neq i} \frac{p_j}{d_{ij}}$ com p_j a demanda associada à estação j .

5.1 A importância do usuário

Métricas puramente topológicas tratam todos os nós e arestas como equivalentes em natureza, distinguindo-os apenas pela posição estrutural. Em um sistema metroviário real, porém, o que confere significado a uma estação não é apenas sua posição no grafo, mas o volume e o padrão de viagens que a atravessam. Por isso, a modelagem do usuário é parte constitutiva do problema.

A incorporação do usuário cumpre três funções no modelo. Primeiro, pondera as arestas: tempos de viagem, fluxos e distâncias deixam de ser atributos abstratos e passam a refletir a demanda da OD 2023, de modo que caminhos de menor custo correspondam a escolhas plausíveis de deslocamento. Segundo, valida as métricas: uma estação pode ter alta intermediação topológica e baixa relevância de demanda, ou o inverso; o cruzamento entre centralidade e carga revela onde a estrutura e o uso coincidem ou divergem. Terceiro, ancora os efeitos distributivos: a acessibilidade ganha sentido apenas quando referida a populações e origens concretas, na Zona Leste, polos emissores como Cidade Tiradentes, Guaianases, Artur Alvim, Itaquera e São Mateus.

Em síntese, o usuário transforma um exercício de geometria de grafos em um problema de planejamento de transporte: a topologia ótima passa a ser aquela que melhor atende ao padrão observado de viagens, e não a que maximiza métricas no abstrato.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

5.2 O problema das APIs e dos dados

A modelagem orientada à demanda depende criticamente da disponibilidade e da qualidade dos dados, e é nesse ponto que surgem as principais limitações práticas. Três ordens de dificuldade merecem registro.

5.3 Dados de demanda

A OD 2023 fornece a base mais robusta para caracterizar viagens na RMSP, mas é uma pesquisa amostral, com periodicidade longa e agregação zonal. O recorte da Região Leste (zonas 166 – 267) exige tratamento dos dados desagregados e hipóteses de expansão para o universo, com as incertezas inerentes a qualquer inferência amostral.

5.4 Dados de rede e operação

A descrição física da rede (estações, traçados, tempos entre estações) e os dados operacionais (frequências, capacidades, carregamentos) provêm de fontes heterogêneas e nem sempre interoperáveis. APIs públicas de mobilidade, quando existem, variam em cobertura, formato e estabilidade, e raramente expõem matrizes de fluxo em granularidade adequada. A consequência prática é a necessidade de uma camada de integração que normalize fontes distintas em um grafo único e consistente.

5.5 Acoplamento dado–modelo

Há, por fim, o risco de descasamento entre a granularidade do dado e a granularidade do modelo: trabalhar no nível de estação exige dados que muitas vezes só existem no nível de zona ou de linha. Parte do esforço de modelagem consiste, portanto, em definir regras explícitas de *coarse-graining* e de imputação, documentando as hipóteses adotadas para que os resultados sejam auditáveis. Essas restrições de dados condicionam diretamente os requisitos do software, tratados a seguir.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

5.6 Modelagem de requisitos de software

A operacionalização do problema demanda um modelo computacional próprio, que desenvolveremos em *Python* e *MATLAB*. A escolha das duas plataformas é deliberada e divide responsabilidades segundo suas forças: *Python* concentra a aquisição, a limpeza e a integração dos dados, bem como a construção e a análise do grafo (com bibliotecas de redes complexas e de computação científica); *MATLAB* concentra a formulação e a resolução do modelo de otimização e as rotinas de álgebra matricial e de simulação numérica, aproveitando seu ferramental consolidado de otimização. A interface entre as duas plataformas se dá por arquivos intermediários padronizados (por exemplo, a matriz de adjacência ponderada e os vetores de demanda), preservando a rastreabilidade entre etapas.

Nesta seção, a modelagem de requisitos descreve o que o modelo deve fazer e sob quais restrições, antes de detalhar a metodologia. Em termos funcionais, o modelo a ser construído deverá: (i) importar e tratar os dados desagregados da OD 2023 e os dados físicos da rede; (ii) montar o grafo $G = (N, E)$ nas representações *L-space* e *P-space*, com arestas ponderadas por tempo, fluxo e distância; (iii) simular a alocação de fluxos por caminhos de menor custo; (iv) calcular as métricas topológicas relevantes (grau, *betweenness*, eficiência e *information centrality*); (v) comparar cenários (rede atual versus rede expandida) segundo essas métricas; e (vi) resolver o problema de otimização topológica que seleciona intervenções. Em termos não funcionais, são requisitos centrais a reprodutibilidade (mesma entrada produz a mesma saída, com sementes fixadas), a rastreabilidade das hipóteses de dados, a modularidade entre as etapas de dados, grafo e otimização, e o desempenho compatível com grafos da escala da rede metroviária da RMSP.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

6 RESULTADOS DA MODELAGEM COMPUTACIONAL

O modelo foi implementado (camada de dados em Python; núcleo de cálculo em MATLAB, sem toolboxes proprietárias) e aplicado à malha metroferroviária da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), representada na Figura 1. A rede base reúne $N = 172$ estações e 182 conexões físicas, cobrindo as seis linhas de metrô e as sete linhas de trens, com as baldeações colapsadas em nós únicos. Considera-se exclusivamente a rede sobre trilhos; os corredores de ônibus e BRT do sistema metropolitano não são modelados. Sobre essa base, avaliou-se o impacto da Linha 16 como eixo estruturante da Zona Leste, em quatro cenários incrementais:

- **Cenário 1 — Atual:** rede em operação.
- **Cenário 2 — Atual + L16:** inclusão da Linha 16.
- **Cenário 3 — Expandida + L16:** rede atual acrescida da extensão da Linha 2 até a Penha e da extensão da Linha 15 até Cidade Tiradentes (*rede expandida*), com a Linha 16.
- **Cenário 4 — Expandida + L16 + L14:** acréscimo da Linha 14, em traçado orbital no Leste.

A ponderação por demanda utiliza os dados desagregados da Pesquisa Origem–Destino 2023 (OD 2023) atribuídos às estações da Região Leste e a representação das linhas novas segue os traçados dos respectivos projetos.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

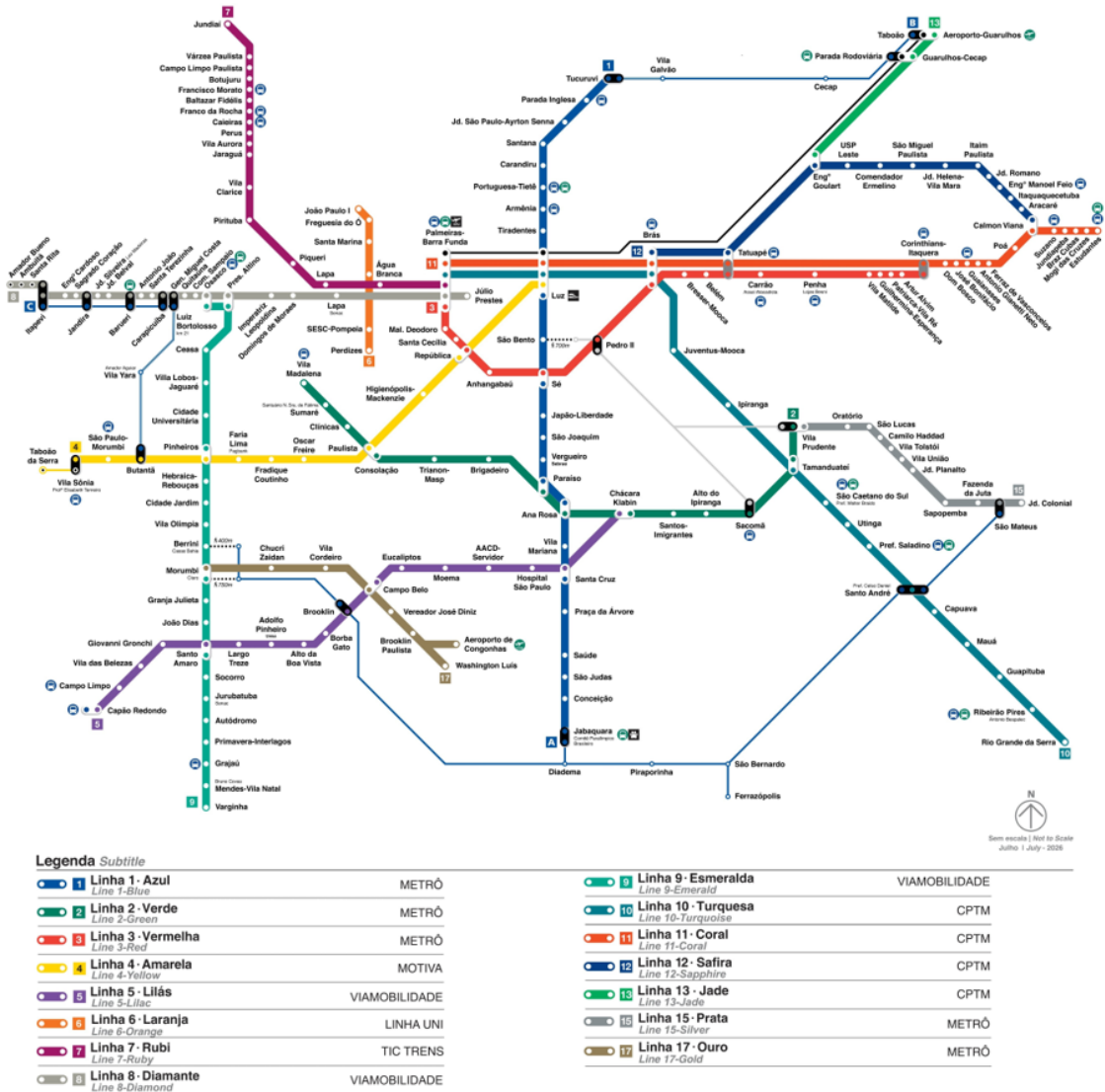


Figura 3: Figura 4 – Rede metroferroviária da RMSP considerada no estudo Fonte: adaptado de Metrô-SP (2026).



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

6.1 INDICADORES GLOBAIS

A Tabela 2 reúne os indicadores topológicos globais nos quatro cenários. A cada linha adicionada, o caminho característico topológico encurta de forma monotônica (L em saltos: $14,25 \rightarrow 13,34$, redução de 6,4%) e a malha ganha circuitos (índice de *meshedness* α : $0,0324 \rightarrow 0,0433$, aumento de 33,6%), sinal de maior redundância e de rotas alternativas.

O maior salto estrutural ocorre no Cenário 4, com a Linha 14. Sua geometria explica o efeito: em vez de mais um eixo radial, a Linha 14 conecta **transversalmente** as linhas radiais do Leste — a Linha 10 em Pirelli/ABC, a Linha 15 em Sapopemba, as Linhas 3 e 11 em Corinthians-Itaquera, a Linha 12 em São Miguel Paulista e a Linha 13 em Bonsucesso — sem passar pelo centro, formando um **arco orbital** que liga os radiais entre si.

Como, na rede atual, quase todo deslocamento inter-radial é forçado a atravessar o centro, esse anel cria atalhos transversais inexistentes, o que responde pelo maior ganho de eficiência topológica, que sobe de 0,1078 para 0,1117 (+3,5%). As eficiências normalizadas por distância e por demanda variam pouco, comportamento coerente com o efeito de diluição das métricas globais normalizadas.

A eficiência global $E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}$ (5) é normalizada pelo número de pares $N(N-1)$; a inclusão de estações periféricas acrescenta muitos pares de longa distância e, consequentemente, reduzindo a média de $1/d_{ij}$. Esse comportamento das métricas globais normalizadas é discutido por Latora e Marchiori (2001). Assim, o ganho da intervenção é de natureza estrutural e distributiva, não plenamente capturável pela média agregada na linha isoladamente, mas pela observação da rede como um todo.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Tabela 2 – Indicadores topológicos globais nos quatro cenários analisados Fonte: elaboração própria.

Indicador	Atual	+L16	Exp.+L16	Exp.+L16+L14
Nós (N)	172	183	195	199
Arestas	182	194	209	215
Grau médio $\langle k \rangle$	2,116	2,120	2,144	2,161
Densidade	0,01238	0,01165	0,01105	0,01091
Clustering médio	0,00736	0,00692	0,00650	0,00637
L (saltos)	14,253	14,042	13,897	13,336
L (km)	27,096	26,572	26,527	26,440
L_P (transbordos)	2,561	2,593	2,556	2,541
Eficiência E (topológica)	0,1079	0,1079	0,1078	0,1117
Eficiência E (km)	0,06906	0,06978	0,06892	0,06814
Eficiência E (demanda)	0,05264	0,05202	0,05189	0,05120
α (meshedness)	0,0324	0,0332	0,0390	0,0433
β	1,0581	1,0601	1,0718	1,0804
γ	0,3569	0,3573	0,3610	0,3638

6.2 CENTRALIDADE DAS ESTAÇÕES DA ZONA LESTE E PONTOS DE INTERESSE

A análise de nós concentra-se em estações representativas da Zona Leste (Linhas 2, 3, 15 e 16), acrescida de quatro *pontos de interesse* do sistema — Sé, Luz, Brás e Ana Rosa —, cuja evolução revela como as intervenções no Leste afetam os principais concentradores da rede. As Tabelas 3 e 4 repetem o mesmo conjunto de estações ao longo dos quatro cenários (“NA” indica estação inexistente no cenário).



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A **centralidade da informação** (Tabela 3, Equação (6)), medida de robustez, sintetiza o resultado central. A criticidade de **Tatuapé**, gargalo histórico bastante conhecido do eixo leste, desaba de 0,142 (atual) para 0,041 na rede expandida com a Linha 16 (–71%) e para 0,030 com a Linha 14 (–79%).

O efeito alcança também o principal concentrador de todo o sistema metroferroviário: a criticidade da Estação **Brás** cai de 0,184 para 0,057 com a expansão (–69%), e a da **Sé** recua 44%. Como observado em outros sistemas metroviários (**SHIRAI et al., 2019**), ao oferecer rotas alternativas o conjunto de intervenções reduz a dependência da rede em seus nós mais carregados.

Em sentido oposto, a Linha 16 eleva a importância da Estação **Ana Rosa** a novo polo de integração (0,058 → 0,140 já no Cenário 2) e reforça a Estação Oscar Freire (0,031 → 0,054).

Tabela 2: Centralidade da Informação (Equação (6)) das estações-foco nos quatro cenários. Valores maiores indicam maior criticidade (menor robustez). Os quatro



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

primeiros nós da rede são pontos de interesse do sistema; os demais, da Zona Leste.
Fonte: elaboração própria

Estação	Atual	+L16	Exp.+L16	Exp.+L16+L14
<i>Pontos de interesse do sistema</i>				
Brás	0,184	0,172	0,057	0,055
Luz	0,102	0,095	0,088	0,087
Sé	0,089	0,059	0,051	0,050
Ana Rosa	0,058	0,140	0,085	0,082
<i>Zona Leste</i>				
Tatuapé	0,142	0,134	0,041	0,030
Tamanduateí	0,137	0,129	0,081	0,081
Vila Prudente	0,076	0,072	0,061	0,053
Oscar Freire	0,031	0,054	0,049	0,048
Sapopemba	0,019	0,018	0,014	0,028
Corinthians-Itaquera	0,012	0,011	0,012	0,020
Penha	0,010	0,009	0,019	0,017
São Miguel Paulista	0,003	0,002	0,002	0,010
São Mateus	0,002	0,001	0,005	0,006
Artur Alvim	-0,000	-0,000	0,002	0,003
Anália Franco	NA	0,008	0,024	0,022
Cidade Tiradentes	NA	-0,007	0,001	0,001
Jardim Colonial	-0,005	-0,005	0,003	0,005

A **centralidade de intermediação** ponderada por distância (Tabela 4, Equação (2)) mostra a redistribuição de carga. Um contraste é ilustrativo: a intermediação absoluta do **Brás** *umenta* (12.532 → 13.410), ou seja, a rede segue roteando grande fluxo por ele, mas sua **centralidade da informação** cai fortemente — a rede usa o Brás, mas deixa de *depend*er dele, porque surgem caminhos alternativos que reforçam no conceito de rede. Na Zona Leste, estações antes terminais passam a nós de passagem: Penha (1.238 → 3.430), Vila Prudente (3.220 → 7.640), São Mateus (340 → 2.610) e a nova Anália Franco (3.122). A Linha 14 acentua o efeito no anel: Sapopemba (1.008



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

→ 4.564, +353%), Corinthians-Itaquera (3.596 → 5.560) e São Miguel Paulista (1.880 → 2.746).

Tabela 3: Centralidade de intermediação (ponderada por distância, Equação (2)) das estações-foco nos quatro cenários. Fonte: elaboração própria

Estação	Atual	+L16	Exp.+L16	Exp.+L16+L14
<i>Pontos de interesse do sistema</i>				
Brás	12.532	12.686	13.186	13.410
Sé	10.012	9.400	9.070	9.356
Luz	6.738	6.914	8.156	8.500
Ana Rosa	6.134	10.714	10.100	10.330
<i>Zona Leste</i>				
Tamanduateí	6.478	6.968	9.656	9.966
Tatuapé	8.850	9.532	8.986	8.754
Vila Prudente	3.220	3.440	7.640	7.724
Corinthians-Itaquera	3.596	3.860	4.254	5.560
Oscar Freire	3.182	5.116	5.392	5.516
Sapopemba	1.008	1.074	3.314	4.564
Penha	1.238	1.326	3.430	3.108
Analía Franco	NA	720	3.122	2.850
São Miguel Paulista	1.880	2.012	2.050	2.746
São Mateus	340	362	2.610	2.790
Cidade Tiradentes	NA	0	448	424
Artur Alvim	150	150	1.400	1.396
Jardim Colonial	0	0	2.252	2.424



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

6.3 Síntese e representação espacial

Lidos em conjunto, os cenários compõem uma narrativa coerente. A Linha 16 funciona como eixo estruturante, criando um polo de integração em Ana Rosa e reforçando Oscar Freire, mas, isolada (Cenário 2), deixa o extremo leste como terminal (Cidade Tiradentes com intermediação nula).

As extensões das Linhas 2 e 15 (Cenário 3) integram o extremo Leste e as estações Penha, Vila Prudente, Anália Franco e Cidade Tiradentes tornam-se “nós” de passagem na rede e desarmam o gargalo de Tatuapé.

A Linha 14 (Cenário 4) entrega o maior ganho estrutural global e redistribui carga para o anel orbital. A Figura 5 mostra a malha topológica da rede atual (com pontos destacados na região de interesse; as Figuras 6 e 7 mostram a evolução das métricas por estação.

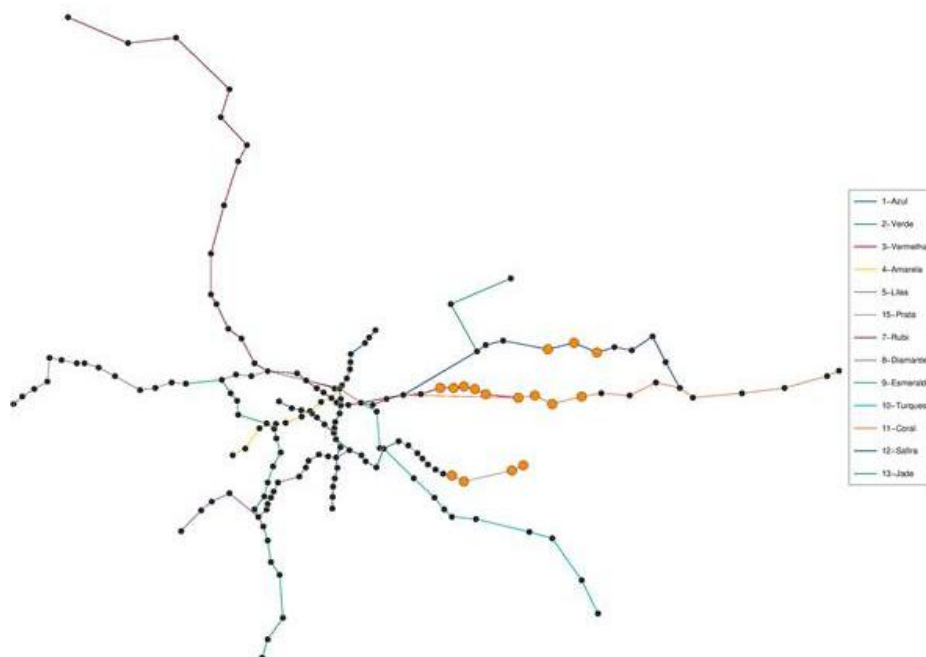


Figura 4: Rede atual da RMSP (Cenário 1) Fonte: elaboração própria.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

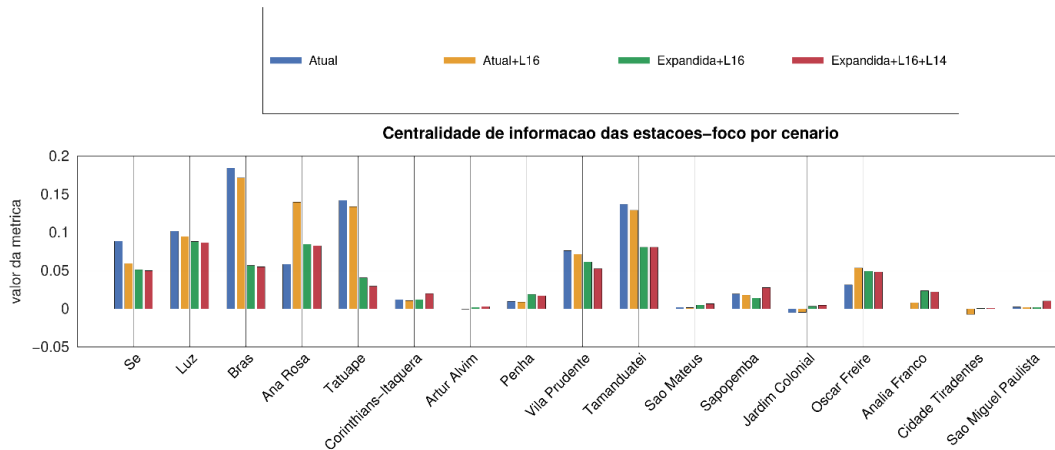


Figura 6 – Centralidade da informação das estações por cenário Fonte: elaboração própria.

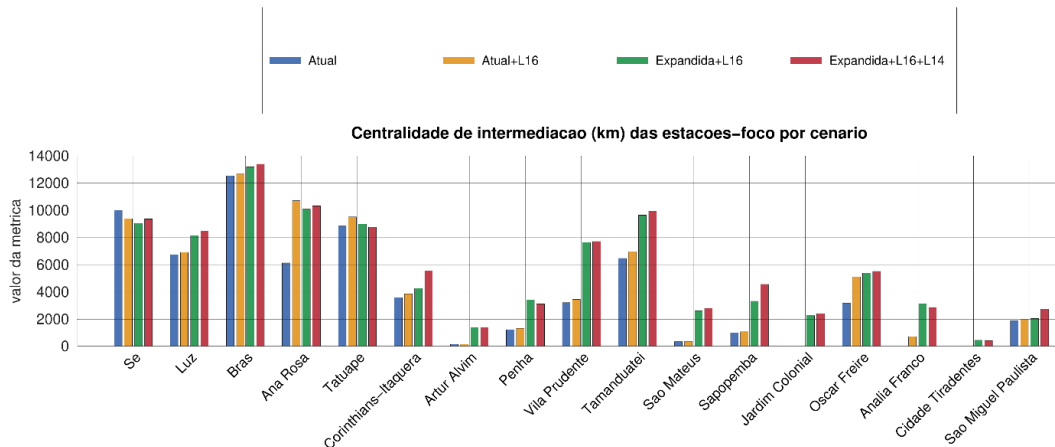


Figura 7 – Centralidade de intermediação das estações por cenário Fonte: elaboração própria.

Em conjunto, os resultados sustentam empiricamente a hipótese central deste trabalho: a Linha 16, sobretudo combinada com as extensões e com a Linha 14, não canibaliza a demanda existente, mas redistribui carga, integra o leste profundo (Cidade Tiradentes) e desarma o gargalo histórico Tatuapé–Tamanduateí, reduzindo inclusive a dependência de concentradores centrais como o Brás. Esse resultado justifica que a função-objetivo da otimização pondere termos de demanda e de resiliência, e não apenas a eficiência topológica agregada.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

7 CONCLUSÃO

Os resultados quantitativos evidenciam o argumento territorial que abre este trabalho. O conceito de segregação socioespacial extrapola a definição apresentada na Seção 2, segundo o qual populações de menor renda enfrentam dificuldade de acesso em razão de sua localização em áreas mais distantes dos principais polos de emprego e serviços. Essa configuração apresenta uma geometria que a própria rede metroviária favorece, concentrando o deslocamento inter-radial ao atravessar a região central da cidade.

Analizando essa geometria com as intervenções propostas, demonstra o potencial de reduzir esse efeito, ampliando a flexibilidade dos deslocamentos cotidianos por meio da incorporação de novas alternativas de percurso e do aumento da redundância da rede.

O conjunto da Extensão da Linha 2, da Linha 14, da Extensão da Linha 15 e do eixo estruturante da Linha 16 reduz em até 79% a criticidade de gargalos históricos no eixo Leste, como na Estação Tatuapé. Promovendo estações que antes eram terminais, como: Penha, Vila Prudente, São Mateus, Sapopemba a nós de passagem plenamente integrados à malha.

Em termos distributivos, isso significa ampliar a conectividade dos setores periféricos da cidade como os bairros Cidade Tiradentes, Guaianases, Itaquera, São Miguel Paulista ao restante da cidade, não somente por uma via radial saturada, mas por caminhos alternativos em que a rede atual não oferece.

A otimização topológica de redes de transporte, portanto, deixa de representar apenas um exercício abstrato de eficiência de grafos e passa a constituir um instrumento capaz de promover maior conectividade territorial e ampliar a acessibilidade da população. Sob essa perspectiva, o fortalecimento da malha metroviária na Zona Leste contribui para reduzir desigualdades de acesso historicamente associadas à configuração urbana do município.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BARTHÉLEMY, Marc. Spatial networks. Physics Reports, v. 499, n. 1-3, p. 1–101, 2011.
- [2] CASTELLS, Manuel. A questão urbana. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1983.
- [3] CHRISTIDIS, Panayotis et al. The post-pandemic recovery of transport activity: emerging mobility patterns and repercussions on future evolution. Sustainability, v. 13, n. 11, p. 6359, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su13116359>. Acesso em: 13 jul. 2026.
- [4] COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO (METRÔ). Conheça a futura Linha 19-Celeste. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.metro.sp.gov.br/sua-viagem/linha-19-celeste/>. Acesso em: 13 jul. 2026.
- [5] COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO (METRÔ). Mapa da rede metroviária. São Paulo, 2026.
- [6] COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO (METRÔ). Pesquisa Origem-Destino 2023 da Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo: Metrô, 2023.
- [7] COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO (METRÔ). Plano integrado de transportes urbanos – PITU 2040. São Paulo: Metrô, 2020.
- [8] CRUCITTI, Paolo; LATORA, Vito; PORTA, Sergio. Centrality measures in spatial networks of urban streets. Physical Review E, v. 73, 036125, 2006.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

[9] DERRIBLE, Sybil; KENNEDY, Christopher. The complexity and robustness of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 389, n. 17, p. 3678–3691, 2010.

[10] FREEMAN, Linton C. A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, v. 40, n. 1, p. 35–41, 1977.

[11] GUALBERTO, Fellipe. Linha 14-Ônix deverá ligar Guarulhos ao ABC Paulista. 2024. Disponível em: <https://www.metrocptm.com.br/linha-14-onix-ligara-guarulhos-ao-abc/>. Acesso em: 13 jul. 2026.

[12] HUGHES, Pedro Javier Aguerre. Periferia: um estudo sobre a segregação socioespacial na cidade de São Paulo. 2004. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2004.

[13] LATORA, Vito; MARCHIORI, Massimo. Efficient behavior of small-world networks. *Physical Review Letters*, v. 87, n. 19, 198701, 2001.

[14] LATORA, Vito; MARCHIORI, Massimo. A measure of centrality based on network efficiency. *Journal of Economic Dynamics and Control*, v. 31, n. 12, p. 3863–3888, 2007.

[15] LIN, Jian; BAN, Yifang. Complex network topology of transportation systems. *Transport Reviews*, v. 33, n. 6, p. 658–685, 2013.

[16] LOGIODICE, Pedro; GIANNOTTI, Mariana. Desigualdade no transporte público em São Paulo. *Urban Studies*, 2025.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

[17] METRÔCPTM. Linha 16: novo traçado aproxima integração com a Linha 6-Laranja.

2024. Disponível em: <https://www.metrocptm.com.br/linha-16-violeta-novo-tracado/>.

Acesso em: 13 jul. 2026.

[18] OLIVEIRA, Filipe Vieira de. Urbanização e formação socioespacial da Zona Leste da cidade de São Paulo. arq.urb, 2016.

[19] RODRIGUE, Jean-Paul. The geography of transport systems. 5. ed. New York: Routledge, 2020.

[20] SANTOS, Milton. A urbanização brasileira. São Paulo: Hucitec, 1993.

[21] SÃO PAULO (Estado). Governo do Estado. Consulta pública da Linha 16-Violeta.

São Paulo, 2025. Disponível em:

<https://www.parceriaseminvestimentos.sp.gov.br/projeto-qualificado/linha-16-violeta/>. Acesso em: 13 jul. 2026.

[22] SEN, Parongama et al. Small-world properties of the Indian railway network. Physical Review E, v. 67, 036106, 2003.

[23] SHIRAI, Oswaldo et al. Complex network analysis: Mexico City's metro system. 2019.

[24] TORRES, Haroldo da Gama; MARQUES, Eduardo (org.). São Paulo: segregação, pobreza e desigualdades sociais. São Paulo: Editora Senac, 2005.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

[25] WATTS, Duncan J.; STROGATZ, Steven H. Collective dynamics of "small-world" networks. Nature, v. 393, p. 440–442, 1998.