

ANÁLISE TOPOLÓGICA DE REDES METROVIÁRIAS DE BAIXO DESEMPENHO A PARTIR DE MÉTODO BASEADO NA TEORIA DE GRAFOS PARA CARACTERIZAÇÃO DE SUA PARTICIPAÇÃO NA MOBILIDADE URBANA

Bruno Pustilnick Maia

Hostilio Xavier Rattón Neto

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Programa de Engenharia de Transporte

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo classificar topologicamente redes metroviárias que apresentam baixa participação no transporte de passageiros, a fim de identificar suas características e compreender sua função na mobilidade urbana. O objeto de estudo é a rede da cidade do Rio de Janeiro. A adoção do método baseado na teoria de grafos proporcionou a caracterização e compreensão da função exercida pela rede metroviária da cidade do Rio de Janeiro, sendo classificada como de baixa complexidade e focada na rápida conexão entre o centro e os subúrbios. Esses dados são úteis para compreensão do estado atual dessas redes, assim como futuras análises sobre seu planejamento e evolução.

ABSTRACT

The present work aims to classify subway networks which have low participation on passenger transportation by their topologies, in order to identify their features and their role on the urban mobility. The object of this research is the Rio de Janeiro's subway network. The adoption of method based on graph theory provides a definition of the features and the role performed by Rio de Janeiro's subway network, classified as a low complexity network, focused on high speed connection between the core area and the suburbs. These data are useful to comprehend the current state of these networks, as well as for future researches about their planning and evolution.

1. INTRODUÇÃO

Os motivos que levam redes metroviárias a serem pouco eficientes podem ser diversos, como questões tarifárias, políticas públicas precipitadas ou negligentes, problemas operacionais, e até a própria distribuição espacial da rede. Essa última é mais complexa de ser solucionada, já que o que está construído dificilmente será desfeito ou alterado, devido, entre outros fatores, aos elevados custos financeiros e sociais de tal ação. Diante desse cenário, cabe, portanto, que se compreenda como o desenho da rede influencia sua função na mobilidade da cidade, para que, assim, seja possível detectar suas falhas e potencialidades.

Porém, outro problema envolve algumas redes nesse sentido. Há casos nos quais as cidades possuem pouco material de estudo sobre sua própria rede metroviária, deixando lacunas na compreensão de seus objetivos. Essa deficiência de material prejudica o planejamento e execução de intervenções que possam lograr melhorias para a mobilidade da população, principalmente para os estratos sociais que mais se valem do transporte público coletivo: as camadas mais pobres da sociedade.

A presente pesquisa se justifica pela necessidade de compreensão das características do desenho dessas redes frente à mobilidade urbana para detecção de possíveis falhas de planejamento ou execução. Nos últimos anos, os estudos topológicos voltados para as redes de metrô vêm ganhando cada vez mais destaque, sobretudo com a utilização da teoria de grafos.

Com base no método de classificação de redes metroviárias desenvolvido por Derrible(2010), os dados da rede da cidade do Rio de Janeiro foram inseridos em conjunto com os casos já pesquisados pelo autor, a fim de que se tenha referências para comparação. Espera-se que por esse meio seja possível contribuir com a clarificação das características desse tipo de rede.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o presente trabalho foram considerados pertinentes tanto os estudos que explorassem a relação entre as redes metroviárias e a mobilidade das cidades, como aqueles que aplicassem metodologias para análise topológicas sobre esse tipo de rede, com destaque para a teoria de grafos.

2.1 Mobilidade urbana e as redes metroviárias

Litman (2006) avalia os benefícios gerados pela implantação e utilização das redes ferroviárias e metroviárias, tanto endógenos como exógenos, para os usuários e não usuários. Em relação aos congestionamentos, o autor sugere que podem ser reduzidos com o transporte sobre trilhos de três formas: 1- com o usuário de carro migrando para o modo sobre trilhos, o que reduziria seu tempo de viagem, somado a uma percepção do seu melhor aproveitamento durante o trajeto, já que o passageiro pode realizar outras atividades como estudo, relaxamento ou trabalho (dependendo das condições dos trens e das estações), em vez de apenas dirigir.; 2- quanto piores forem as alternativas, mais relutante o usuário do carro estará em trocá-lo em favor do transporte coletivo, principalmente em horários de pico de tráfego. Do contrário, com a melhoria do transporte sobre trilhos, a chance dessa troca ocorrer é maior, beneficiando tanto o usuário do transporte coletivo, quanto aquele que se manteve no rodoviário individual; 3- o transporte sobre trilhos estimula o desenvolvimento de TODs (*Transit Oriented Development*), diminuindo a necessidade da população utilizar carros ou ônibus para realizar atividades rotineiras.

Além desses benefícios, o transporte sobre trilhos gera economia com estacionamentos e no consumo de combustíveis e energia, além de reduzir acidentes, emissão de gases poluentes e ruídos, melhorando a saúde da população. Em relação aos impostos pagos, o transporte sobre trilhos demanda cerca de US\$ 100,00 per capita anualmente, porém gera uma economia indireta de US\$450,00 no mesmo período. Os elevados gastos iniciais seriam justificados pelos benefícios gerados. (LITMAN,2006)

São muitas as vantagens advindas do bom uso de um sistema metroviário de qualidade, principalmente no que diz respeito à qualidade de vida, não só de seus usuários, mas também da sociedade como um todo.

2.2 A aplicação da teoria de grafos na análise de redes metroviárias

A rede como estrutura pela qual um sistema funciona é comumente expressa na forma de um desenho esquemático. Nesse tipo de representação, podem ser observados nós e arcos, que indicam a localização e as características de seus elementos. Cada rede possui uma idiosincrasia, demandando ferramentas e métodos específicos, fazendo com que generalizações induzam os pesquisadores e analistas a equívocos. Esses arranjos únicos geram diferentes efeitos no meio em que atuam e sobre o sistema que sustentam.

As redes de transporte não fogem à essa regra e, quando planejadas, as decisões sobre sua topologia devem considerar algumas especificidades. Wonz e Magnanti (2001), ao abordarem modelos e algoritmos para o desenho das redes, preocuparam-se em discriminar as de transportes, ainda que utilizassem os mesmos modelos matemáticos das demais. Para os autores, as redes de transporte se diferenciam em cinco pontos. São eles:

1- As escalas de tempo: os efeitos do planejamento de uma rede de transportes devem considerar o longo prazo, o que eleva o grau de incerteza dos resultados.

2- Oferta e demanda: a construção de rodovias e ferrovias altera o uso do solo e o padrão de demanda dos usuários.

3- Tráfego e congestionamento: enquanto nas redes de comunicação os retardamentos de fluxo ocorrem nos nós da estrutura (por exemplo, na fila de espera telefônica de uma empresa), nas redes de transporte os usuários gastam mais tempo nos arcos (nas linhas férreas, nas ruas e estradas, por exemplo).

4- Escolha de rota dos usuários: nas demais redes, como a de comunicação, o sistema tem o controle sobre a escolha das rotas, atuando de forma holística sobre os nós, arcos e fluxos. Na rede de transportes, não há tal controle, sendo o usuário o responsável por essa definição, exigindo do planejador uma percepção do seu comportamento.

5- Variação de demanda: outros sistemas operacionais não são tão sensíveis à variação de demanda como em uma rede de transporte, sobre a qual o administrador exerce menor controle, correndo maiores riscos de prover excesso ou falta de oferta durante a operação.

Soma-se a essas especificidades o fato de as redes de transportes serem majoritariamente planares. Isso significa que, sendo analisada como um grafo, essas redes criam um nó à medida que dois arcos se cruzam, gerando uma nova possibilidade de caminho. Além disso, não é comum que nós muito distantes apresentem uma ligação direta entre eles, sendo necessário passar por outros para que se possa criar um caminho. Essas características são bastante comuns nas redes metroviárias (DERRIBLE, 2010).

Os estudos que se utilizam da topologia das redes para a realização de análises vêm ganhando cada vez mais adeptos nos últimos anos, principalmente na literatura internacional, sendo uma ferramenta cada vez mais aceita pela comunidade científica na área de transportes.

Zhang *et al* (2005) utilizam a análise topológica para avaliar a capacidade de um sistema de transporte para lidar com desastres em sua rede, mensurando sua resiliência. Derrible (2010) caracterizou trinta e três redes de metrô ao redor do mundo, analisando os efeitos e propriedades de seus desenhos. Thiran e Kurant (2006) propuseram um algoritmo para a análise comparativa do fluxo de tráfego de três diferentes modos de transporte público de massa, onde encontraram diferentes padrões de comportamento em redes reais. Zhu e Luo (2016) se utilizam dos estudos topológicos das redes complexas para analisar o metrô de Guangzhou, na China, concluindo que se trata de uma rede do tipo aleatória, e que suas características indicam uma queda de eficiência no serviço, com sobrecarga nas estações de transferência. Roth *et al* (2012) concluíram em sua pesquisa topológica que, no longo prazo, as forças e leis que regem a evolução do desenho das redes metroviárias são independentes das diferenças econômicas e históricas que as cercam.

Diversos autores se valem dos estudos dos grafos para realizar suas análises, traduzindo as informações retiradas dos desenhos das redes e as racionalizando para atingir seus objetivos.

O que se verifica, portanto, é que os sistemas de transporte vêm sendo estudados a partir de princípios topológicos por pesquisadores em todo o mundo. No entanto, no Brasil, esse tipo de pesquisa, que tem foco no transporte público de massa, não vêm sendo explorado com a mesma intensidade, com poucas publicações dessa natureza. Essa lacuna pode ser preenchida com estudos de redes de transporte público que apresentem deficiências oriundas do formato de sua estrutura, sem prejuízo de análise daquelas que sejam consideradas eficientes. Tal iniciativa se faz necessária na medida em que o transporte público coletivo vem perdendo espaço para as opções privadas e individuais, trazendo prejuízos para a mobilidade urbana.

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O procedimento metodológico envolveu a definição do método de análise; a definição de um estudo de caso; aplicação do método ao objeto selecionado; e, por fim, sua caracterização.

3.1 Definição do método de análise

Entre as abordagens pesquisadas, a considerada mais próxima dos objetivos estabelecidos para o presente estudo é a desenvolvida por Derrible (2010), que crê que analisar redes metroviárias de forma holística é de grande utilidade para a fase de planejamento estratégico do transporte. Nesse caso, o foco pode ser dado ao desenho da rede, do qual se pode extrair importantes informações que auxiliam outras ferramentas de análise e planejamento.

Sua abordagem entende que estabelecer métodos de caracterização possibilita tanto avaliar o atual cenário das redes, como simular alterações na mesma, identificando aspectos que podem ser melhorados. Embora existam outras características a serem exploradas, aquelas que, segundo seu entendimento, proporcionam uma visão mais clara sobre função das redes metroviárias são “estado”, “forma” e “estrutura”.

3.1.1 Estado

O “estado” refere-se à atual fase de desenvolvimento de uma rede, podendo ser mais complexa ou simples em termos topológicos, compondo uma estrutura de análise em fases. Esta característica tem forte ligação com o tamanho da rede. Tal característica envolve dois indicadores: o indicador β de complexidade, que é expresso pela razão entre arestas e vértices em um grafo (consideram-se as estações finais e de transferência como vértices e os caminhos que as ligam como arestas), sendo E = aresta e V = vértice. Dessa forma:

$$\beta = E/V \quad (1)$$

; e o grau de conectividade γ , que calcula a razão entre o número de arestas presentes e o potencial do grafo. Para as redes planares, com número de vértices maior ou igual a 3, a quantidade potencial de arestas é: $3V-6$. Logo:

$$\gamma = E / E_{\max}, \text{ dessa forma : } \gamma = E / (3V-6) \quad (2)$$

Em seus estudos, o autor detectou três fases de uma rede em relação ao seu estado: a primeira representa as redes ainda incipientes, recém-criadas ou de pouca extensão, que ainda estão se desenvolvendo, sendo a relação entre β e γ ainda fraca ; na segunda a relação entre β e γ se fortalece, mas ainda com grau de conectividade aquém das potencialidades; na terceira, e última fase, as redes se apresentam próximas do seu maior potencial de complexidade e conectividade.

3.1.2 Forma

A “forma” ilustra o quanto as redes são integradas ao meio em que estão inseridas. As redes podem exercer papéis diferentes dependendo de como foram planejadas. Há três variações da forma das redes: a primeira prioriza o movimento pendular, realizando ligações entre os subúrbios e as áreas centrais das cidades; a segunda concentra-se em uma área específica, detendo-se em servir a população local; a terceira, considerada de cobertura regional, abriga as duas funções anteriores, sendo a mais complexa e completa. Nesta característica são observados três indicadores: o número de linhas da rede, o número total de estações, e a extensão em quilômetros da rede.

A partir da razão entre a extensão R e o número total de linhas NL , foi proposto um novo indicador: a média de extensão das linhas (A). Logo:

$$A = R/NL \quad (3)$$

Também se quantifica o número (NS) e o espaço entre as estações (S), objetivando extrair mais informações sobre a forma das redes. Poucas estações em linhas muito extensas indicam uma tendência de diminuição de tempo de viagem, favorecendo deslocamentos mais distantes,

caracterizando uma cobertura regional. Do contrário, muitas estações em uma pequena extensão de linha, favorece uma cobertura local. Dessa forma:

$$S=R/NS \quad (4)$$

3.1.3 Estrutura

Em relação à “estrutura”, o autor destaca dois indicadores: a conectividade(ρ) e o direcionamento das redes(τ). O primeiro representa a influência e a importância das estações de transferência, sendo ideal que haja mais possibilidades de transferência em poucas estações. Esse indicador é expresso matematicamente da seguinte forma:

$$\rho = (Vtc - Em)/Vt \quad (5)$$

Na equação, Em é o número de arestas múltiplas (o que evita a contabilização em dobro das transferências); Vt é o número total de vértices de transferência; e Vtc o número de possibilidades de transferência.

Já o segundo determina a facilidade de se viajar dentro da rede, evitando múltiplas transferências, geralmente inconvenientes para os passageiros. Sendo δ número máximo de transferências, desde que siga o caminho mais curto que demande o maior número de transferências; e NL o número total de linhas, considera-se:

$$\tau = NL/\delta \quad (6)$$

3.2 Definição do estudo de caso

Dados do Plano de Mobilidade Urbana Sustentável do Município do Rio de Janeiro (2014) mostram que os deslocamentos realizados pelo transporte coletivo na cidade representam 47,33% do total, sendo 4% destes através do sistema metroviário. Esses dados evidenciam a inexpressiva participação direta do metrô no transporte público em uma cidade que assiste a cada ano o crescimento do transporte individual.

Segundo Guedes (2009), a implantação do Metrô na cidade do Rio de Janeiro não foi simples, não houve lógica e nem clareza no processo. Essa afirmação dá uma ideia de como essa estrutura foi e continua sendo bastante complexa na escala local, na qual as contradições ficam mais evidentes, em um desenvolvimento que demorou mais de quarenta anos para ser realizado. Sua pesquisa constatou que as discussões em torno da construção da rede metroviária na cidade do Rio de Janeiro eram mais focadas em soluções tecnológicas em si mesmas do que em uma solução para os problemas de mobilidade. Diante desses fatos, esta rede metroviária foi escolhida como exemplo para a verificação do método. Seu estado no ano de 2019 pode ser verificado na figura 1.

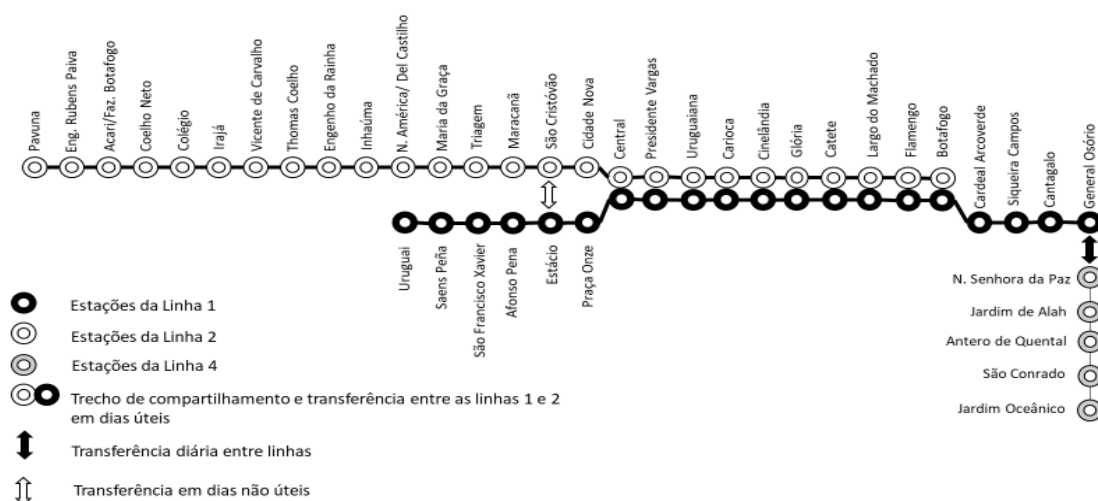


Figura 1: Diagrama da rede metroviária do Rio de Janeiro em 2019.

3.3 Aplicação do método selecionado

O método foi aplicado somando os dados da malha da cidade do Rio de Janeiro aos casos já explorados por Derrible(2010), a fim de que houvesse referências comparativas.

Algumas adaptações ao modelo foram necessárias, pois no caso da rede estudada, a simples observação como um grafo trouxe distorção para a análise, como, por exemplo, o número de estações que permitem transferência de uma linha para outra.

No grafo poderiam ser contadas dez estações que permitem a transferência entre linhas 1 e 2, mas na prática o usuário utiliza apenas uma delas para realizar essa mudança. Dessa forma, na prática, existe uma estação de transferência entre as linhas 1 e 2, e outra entre as linhas 1 e 4. Soma-se a isso a sazonalidade da disponibilidade da estação Estácio para transferências entre as linhas 1 e 2 apenas em dias não úteis. Caso essas informações fossem ignoradas, os cálculos seriam afetados, já que apenas os dados topológicos da rede seriam levados em conta.

Os dados relativos à malha da figura 1, considerados apenas os dias úteis, utilizados para a aplicação do método, estão expressos na tabela 1.

Tabela 1: Dados da rede metroviária da cidade do Rio de Janeiro

Extensão em km	57
Estações	41
Linhas	3
Total de Vértices	5
Vértices em estações finais	3
Vértices em estações de transferência	2
Número máximo de linhas em uma estação	2
Total de arestas	4
Arestas simples	3
Arestas múltiplas	1
Número máximo de transferências	2

Os resultados obtidos para os indicadores de cada característica estão expressos na tabela 2.

Tabela 2: Valores dos indicadores para Estado, Forma e Estrutura

Estado		Forma		Estrutura		
β	γ	A(km)	S(Km)	Vtc	p	τ
0,80	0,44	19	1,39	2,0	0,5	1,5

3.4 Análise e classificação da rede do Rio de Janeiro com base no método selecionado

Através dos dados e indicadores obtidos para a rede da cidade do Rio de Janeiro, foram realizadas as análises de cada característica, e a rede plotada em gráficos juntamente com outras previamente estudadas por Derrible(2010).

3.4.1 Análise do “estado”

Em relação ao seu estado, a rede da cidade do Rio de Janeiro é considerada de baixa complexidade, com uma relação fraca entre β e γ . Mas apesar de estar localizada na primeira fase, é possível perceber uma grande distância entre ela e as redes consideradas menos complexas no nível mundial, o que deve contribuir para os seus problemas de mobilidade

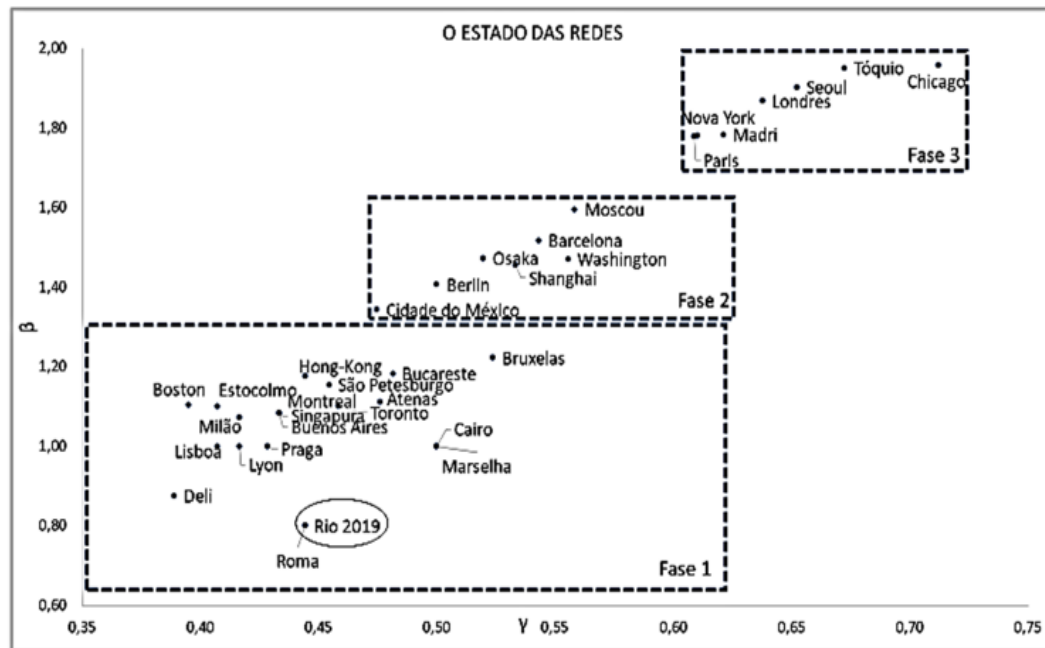


Figura 2: Classificação das redes em relação a característica estado. Adaptado de Derrible(2010).

3.4.2 Análise da “forma”

Em relação à característica forma, a rede se apresenta com uma cobertura voltada para acessibilidade regional, pertencendo ao grupo de malhas que possuem elevada extensão média das linhas em comparação ao número de estações, o que, segundo Derrible(2010), sugere foco em conectar os habitantes do subúrbio às áreas centrais da cidade, atuando como um sistema ferroviário. Aparentemente, há maior interesse nessa conexão do que na melhora da circulação dentro da cidade.

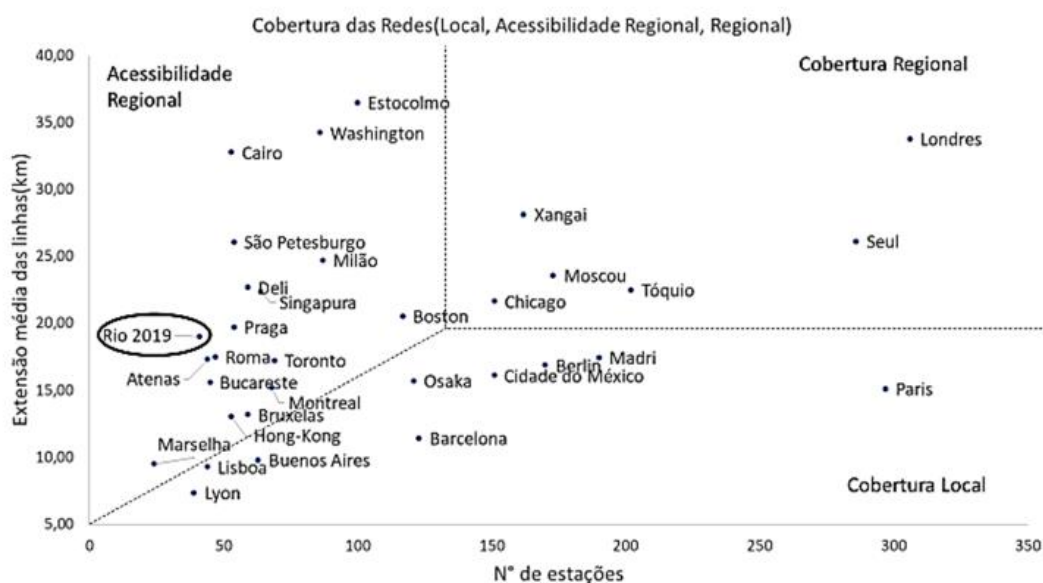


Figura 3: Classificação das redes em relação a característica forma. Adaptado de Derrible(2010).

3.4.3 Análise da “estrutura”

No que tange à estrutura, a rede se encontra voltada para o direcionamento rápido, ou seja, para uma conexão regional, apresentando poucas estações de transferência. Neste caso foram consideradas apenas uma das dez estações de transferência entre as linhas 1 e 2, já que a maioria cumpre o mesmo papel.

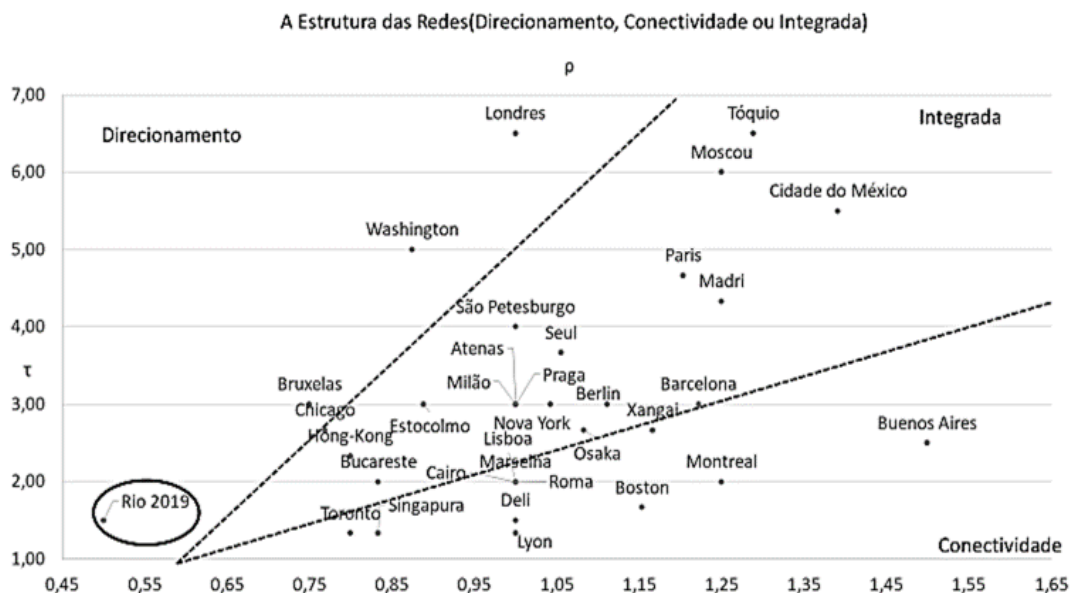


Figura 4: Classificação das redes em relação à característica estrutura. Adaptado de Derrible(2010).

4. CONCLUSÃO

O método desenvolvido por Derrible(2010) possibilitou definir as características da rede metroviária da cidade do Rio de Janeiro, permitindo não somente classificá-la, como também compará-la com exemplos de diferentes escalas de desenvolvimento. Essa análise permite maiores contribuições para a identificação de falhas e potencialidades da rede, auxiliando em futuras pesquisas que venham explorar a evolução desta malha metroviária.

No entanto, é importante registrar que o método necessita ser aplicado com cautela sobre as especificidades de operação das redes, com atenção sobre o número de estações de transferência que existem na prática, assim como sobre o funcionamento ordinário das linhas e estações. Caso contrário, pode se estar avaliando o funcionamento das redes pelo seu potencial e não pelo seu desenvolvimento real.

De maneira geral, o resultado foi satisfatório para o caso específico da rede estudada, indicando benefícios no uso do método para futuras pesquisas em redes incipientes ou pouco eficientes.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Derrible, S.(2010) The properties and effects of metro network designs. Doutorado em engenharia civil. University of Toronto. Toronto, Canadá. Disponível em <https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/26164/3/Derrible_Sybil_201011_Phd_Thesis.pdf>. Acesso em: 30 de abril de 2018

- Guedes, E.(2009) O Metrô do Rio de Janeiro: interesses, valores e técnica em projetos estruturais de desenvolvimento urbano. 340p.. Tese de doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009. Disponível em:<http://web.observatoriodasmetropoles.net/obs/imagens/abook_file/book_file/livro_metrorj.pdf>. Acesso em: 31 de março de 2018.
- Litman, T.(2006) Evaluating rail transit benefits: A comment. *Transport Policy*, vol. 14, n° 1, p. 94-97, jan. 2007. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0967070X0600076X>>. Acesso em: 25 de novembro de 2018.
- METRÔ RIO. Mapa esquemático da rede metroviária do Rio de Janeiro. Disponível em:<https://www.metrorio.com.br/Content/imagens/mapas/mapa_esquematico.pdf>. Acesso em: 12 de janeiro de 2019.
- SECRETARIA MUNICIPAL DE TRANSPORTES DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. Plano de mobilidade urbana sustentável. Disponível em <http://www.rio.rj.gov.br/web/pmud/documentos/-/document_library_display>. Acessado em: 10 de maio de 2018.
- RIO DE JANEIRO, Secretaria de Transportes (SETRANS).(2018). Sistema de metrô do Rio. Rio de Janeiro. Disponível em <<http://www.rj.gov.br/web/setrans/exibeconteudo?article-id=222358>>. Acessado em: 01 de maio de 2018.
- Roth, C. et al. (2012) A long time limit for world subway networks. *Journal of The Royal Society Interface*. N° 9, p. 2540- 2550, 16 de maio de 2012. Disponível em: < <http://rsif.royalsocietypublishing.org/> > Acesso em: 22 de abril de 2018.
- Thiran,P. e Kurant,M. Extraction and analysis of traffic and topologies of transportation networks. *Physical Review*, vol.74, p. 036114-1 a 036114-9, set. 2006. Disponível em: < https://www.researchgate.net/publication/6768767_Extraction_and_analysis_of_traffic_and_topologies_of_transportation_networks>. Acesso em 15 de janeiro de 2019.
- Zhang,X. et al.(2015). Assessing the role of network topology in transportation network resilience. *Journal of Transport Geography*, vol.46, p.35-45. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0966692315000794>>. Acesso em 27 janeiro de 2019.
- Zhu,L. e Luo, J.(2016) The Evolution Analysis of Guangzhou Subway Network by Complex Network Theory. *Procedia Engineering*, vol 137, p. 186-195. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816002629>>. Acesso em 12 de fevereiro de 2019.

Bruno Pustilnick Maia (brunomaiageografia@gmail.com)

Hostilio Xavier Raton Neto (hostilio@pet.coppe.ufrj.br)