

CATEGORIA 1

Uso de indicadores na concepção e análise de redes de alta capacidade.

Marcos Kiyoto de Tani e Isoda

Arquiteto Urbanista, mestre em Planejamento Urbano e Regional pela FAU USP. Trabalhou nos escritórios Valente, Valente: Arquitetos; TC Urbes; OPUS – Oficina de Projetos Urbanos. Atua como consultor em projetos e planos urbanos e leciona Planejamento Urbano na Universidade Anhanguera – Vila Mariana.

INTRODUÇÃO

O objetivo deste artigo é apresentar o potencial do uso de indicadores como ferramentas de projeto e avaliação de redes de transporte de passageiros de alta capacidade através de um conjunto de aplicações práticas. Parte destes indicadores vem sendo pontualmente utilizados pelos órgãos de planejamento de São Paulo (GUTIERRES & SANTOS, 2014). Esta comunicação visa contribuir para a ampliação do uso destas ferramentas.

O objeto de estudo é a rede ferroviária da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), administradas pela Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) e pela Companhia do Metropolitano (Metrô). Aplicamos os indicadores a versões implantadas ou planejadas, em diferentes períodos históricos, além de redes de outras metrópoles, na busca por parâmetros comparativos objetivos.

Esta pesquisa surge da necessidade de compreender e classificar os modos de alta capacidade existentes na RMSP¹ e foi impulsionada pela política recente do Governo do Estado de São Paulo de convergência entre eles numa única “rede com qualidade de metrô”². Uma das metas iniciais era obter parâmetros para a distinção entre eles. Porém, tanto através da análise técnica dos sistemas como através da comparação entre sistemas de outras metrópoles, constatamos que há grande sobreposição das diversas características destes dois modos; e, ao mesmo tempo, há uma grande variação dentro do que se considera um mesmo modo – metrô ou trem de subúrbio – pelo mundo.

A conclusão é de que qualquer delimitação entre os modos será sempre arbitrária e, para o planejamento urbano, mais do que a designação do modo, importam quais são as faixas de capacidade dos sistemas; a rede formada e sua relação com a aglomeração urbana; e a as funções urbanas que eles desempenham.

DIAGNÓSTICO

Modos metrô e trem de subúrbio

A pesquisa foi iniciada buscando a distinção entre os dois modos ferroviários de alta capacidade, metrô e trem de subúrbio³, que resultou infrutífera como demonstraremos a seguir. A busca por essas definições levou à conclusão de que a questão central da discussão deve ser a função urbana a ser atendida por determinado modo, cuja demanda possui

¹ Como parte da pesquisa de mestrado *Transporte sobre trilhos na Região Metropolitana de São Paulo: estudo sobre a concepção e a inserção das redes de transporte de alta capacidade* (ISODA, 2013).

² "Plano de Expansão", depois denominado "Expansão SP", iniciado em 2007 e abandonado por volta de 2011.

³ Termo em desuso mas adotado eventualmente por falta de um mais adequado.

características espaciais e de volume, da qual resultam (ou deveriam resultar) as características tecnológicas dos modos.

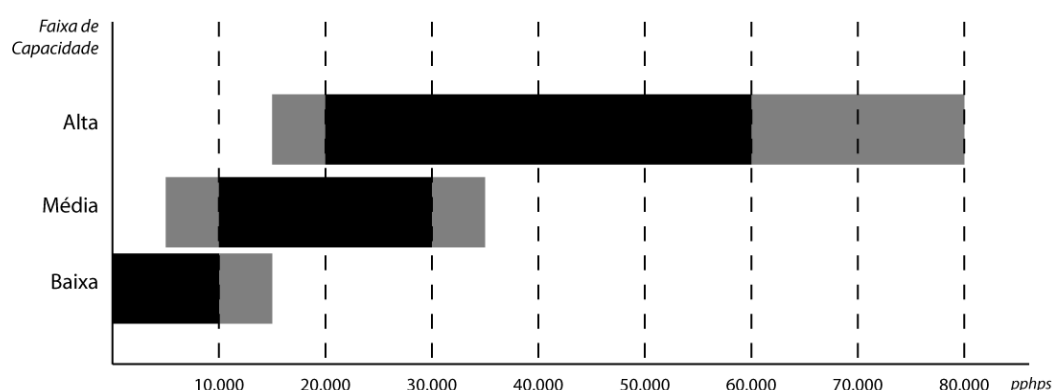
Partimos da definição de modo dada por VUCHIC (2007), que lista 3 características de um modo:

1. Níveis de segregação viária A, B e C, da menor para a maior possibilidade de partilhar o leito com outras funções urbanas. Ou seja, nível C é a menos segregada (ruas comuns) e nível A, a mais segregada (sem nenhum tipo de cruzamento).
2. Tecnologia do sistema, definida por quatro componentes: suporte, o contato vertical do veículo com a superfície onde ele anda; orientação, o modo como o veículo é guiado; tipo de unidade de propulsão e o modo de transferência da tração; Controle, que é o meio de regulação da viagem.
3. Tipo de serviço, definidos pelo tipo de rota (central, urbana, suburbana, regional); tipo de parada que atende (local, expresso); por horário (dia todo, horário de pico, especial); etc.

A partir destas características o autor define três classes de modos, com capacidades e rendimentos crescentes: transporte de rua, transporte semirrápido e transporte rápido. Equivale ao que denominamos de baixa, média e alta capacidade. Segundo o autor, é comum tentar definir um modo somente pelo tipo de suporte e orientação do sistema (ex.: “modos sobre trilhos”) mas, dentre as características citadas, a que mais determina as classes de modos é o *nível de segregação viária*.

Figura 1 - Faixas de Capacidade dos Sistemas de Transporte Coletivo

(Fonte: autoria própria)



O gráfico acima procura resumir estas faixas de capacidade⁴, expressa em *passageiros por hora por sentido*. Os pontos de corte entre cada faixa são arbitrários, variam para cada autor e conforme o desenvolvimento tecnológico de cada período histórico.

Origem do “conceito de alta capacidade”

O objeto de estudo são as redes de alta capacidade, compostas por um conjunto de tecnologias, sistemas e princípios que foram sendo desenvolvidos ao longo de décadas, conforme as demandas dos grandes centros urbanos mundiais. Tudo isso culmina nos sistemas metroviários, dando origem ao que denominados aqui “conceito de alta capacidade”.

Esquemáticamente, podemos resumir a evolução destes sistemas da seguinte maneira: das estradas de ferro (inicialmente para carga, interligando polos produtivos e de distribuição, aos poucos para passageiros de longa distância) surgem os *trens de subúrbio*, serviço de passageiros internos a uma aglomeração urbana. Utiliza a estrutura existente e opera nos

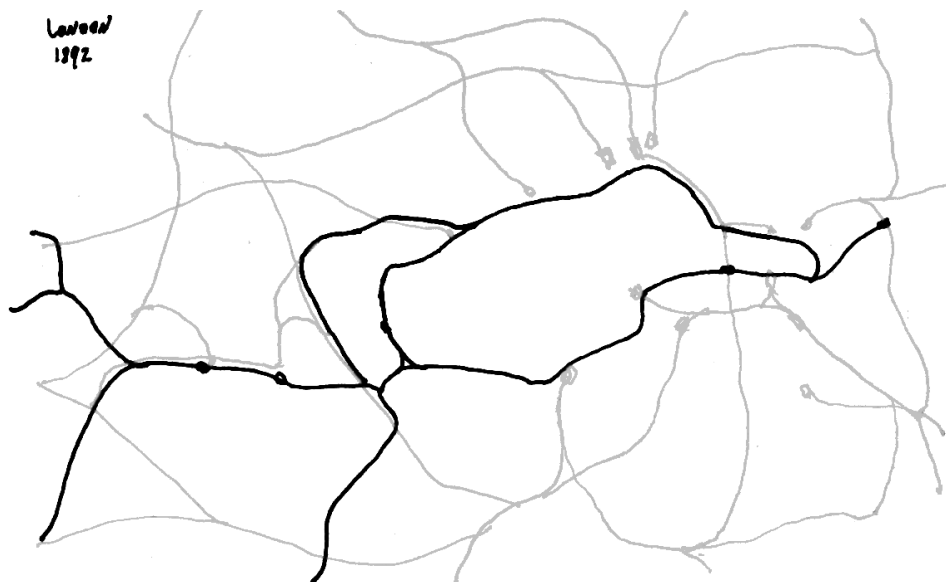
⁴ Elaborado a partir de diversas fontes, sendo as principais VUCHIC (2007), METRÔ (2005) e artigos da Semana de Tecnologia Metroferroviária.

interstícios dos serviços de originais, com características técnicas similares, mas atendendo a uma função urbana distinta (SORT, 2005; VUCHIC, 2007).

Pela dificuldade de adentrar os centros das grandes cidades, foram idealizadas linhas ferroviárias elevadas e subterrâneas (Londres, Berlim, Nova Iorque, Chicago, entre outras), que deram origem às redes de metrô. Eram específicas para passageiros, de atendimento interno à aglomeração (em geral centrais) e segregadas dos demais sistemas. Não se diferenciavam tecnológica e operacionalmente das estradas de ferro, com grande número de ramais e trechos de via compartilhada.

Figura 2 - Linhas subterrâneas de Londres em 1892

(Fonte: autoria própria, elaborado sobre Sort, 2005)



Construídas por companhias diversas, muitas vezes buscavam apenas conectar estações terminais centrais das ferrovias que não conseguiam penetrar nos centros antigos, não possuíam uma unidade como uma rede (SORT, 2005; GARCIA, 2014).

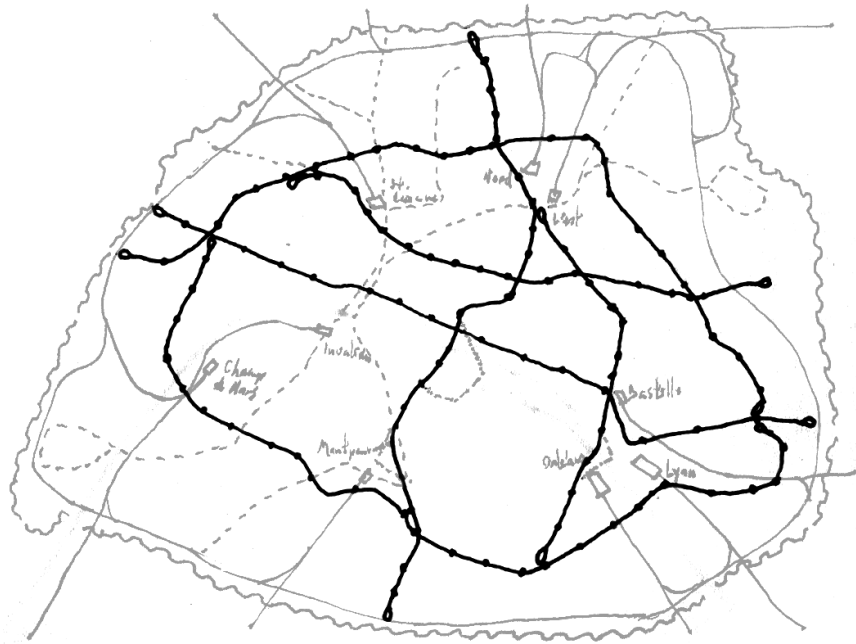
A ideia de metrô como conhecemos se formou num processo de quase 50 anos, com marco inicial em 1863 com a inauguração da primeira linha ferroviária subterrânea em Londres e se

consolidou depois de 1900, com a concepção e construção do metrô de Paris, o primeiro sistema de *linhas independentes* organizadas como uma *rede unificada* e articulada.

Podemos considerar a rede de Paris como um caso prototípico do que chamamos hoje de metrô. Foi um salto qualitativo assumir esses sistemas como exclusivamente voltados para o fluxo urbano (e não regional), como um sistema, uma rede unificada e com identidade própria.

Figura 3 – Rede inicial da rede de metrô de Paris, 1900.

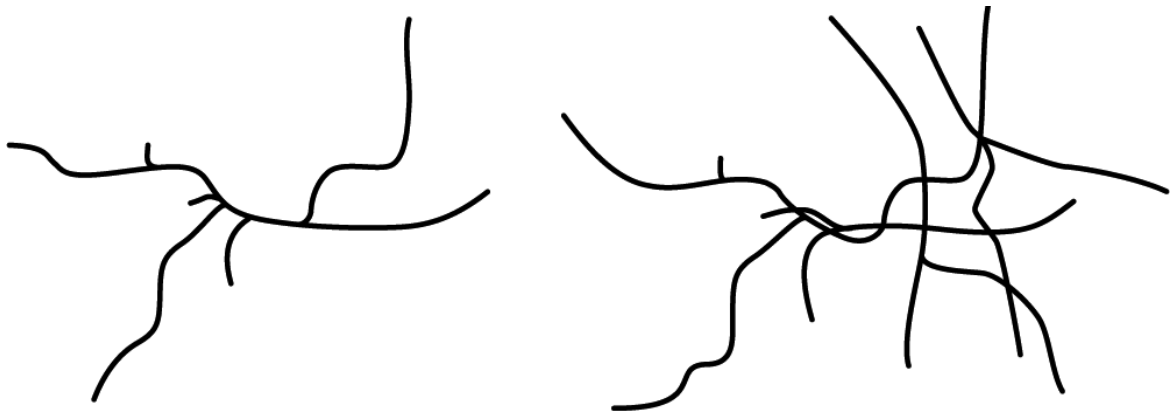
(Fonte: autoria própria, elaborado sobre Sort, 2005)



Não à toa foi em Paris que se cunhou o nome *Métropolitain*, em contraposição aos nomes *Underground* (Londres), *Elevated* e *Subway* (Nova Iorque) e *Untergrund-Bahn* (Berlim), que diferenciavam-se das ferrovias existentes (suburbanas, regionais e de carga) apenas pela sua forma de implantação e não pela sua função urbana.

Figura 4 – Evolução da rede de Berlim entre 1914 e 1931.

(Fonte: autoria própria, elaborado sobre Sort, 2005)

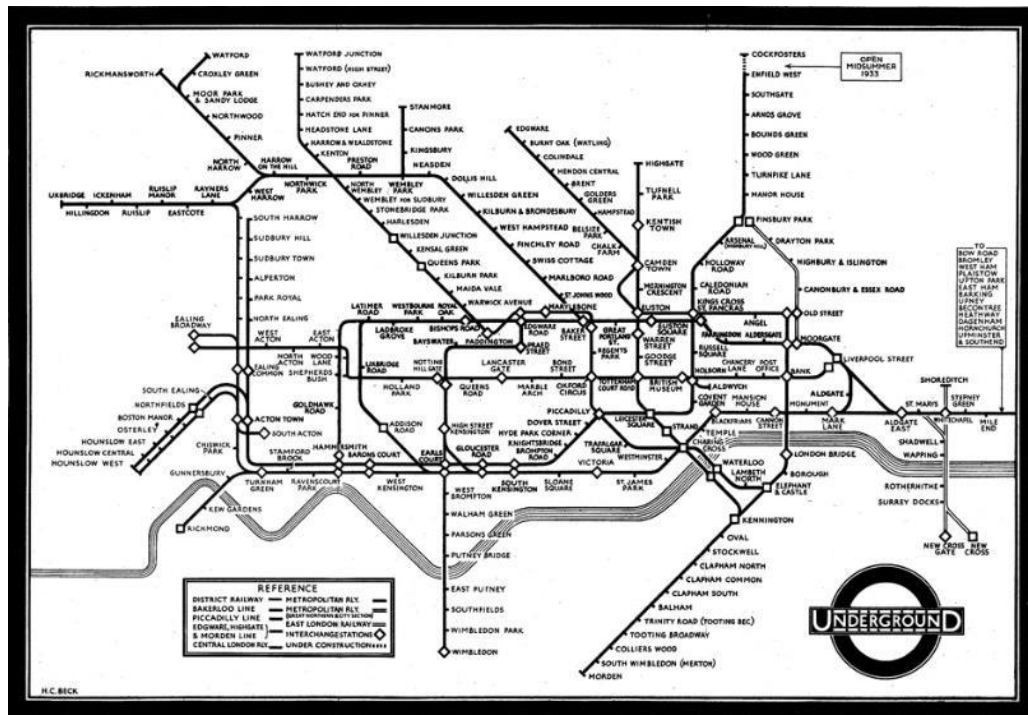


Ao longo desses 50 anos (1860-1910) diversas destas cidades reorganizaram suas redes, tornando as linhas mais independentes (eliminando compartilhamento de vias e ramais) e buscando maior coerência do conjunto. Companhias foram unificadas, em geral sob ação estatal direta ou indireta, e os sistemas passam a possuir identidade própria (GARCIA, 2014).

Visando facilitar a navegabilidade dos passageiros, os mapas abandonaram progressivamente as referências geográficas e detalhes técnico-operacionais. Assumem um caráter esquemático ao representar apenas as linhas, as paradas e as conexões da rede. Esse processo é simbolicamente coroado através do famoso mapa de Harry Beck em 1931 para o sistema londrino, análogo a um circuito elétrico, esquemático e desprovido de proporções geográficas (OVENDEN, 2007).

Figura 5 - Mapa do London Underground, 1931

(Autoria: Harry Beck / fonte: Ovenden, 2007)



Deste processo histórico se desenvolve o que chamamos aqui de *conceito de metrô*, extrapolado para *conceito de alta capacidade*. Podemos resumir este conceito como uma *rede segregada e de linhas exclusivas*. Significa que:

- É um sistema composto por linhas que se organizam espacialmente como uma rede;
- As linhas são segregadas, não sofrem interferências de outros sistemas;
- Cada linha é exclusiva, independente das demais linhas do próprio sistema;
- As linhas se inter-relacionam através de conexões para formar a rede;
- A rede deve possibilitar alternativas de percursos;
- O sistema deve possuir identidade, simplificando o entendimento do usuário.

Todos os sistemas considerados “metrô” pelo mundo orbitam em torno deste conceito central⁵, eventualmente abrindo mão de algumas características, o que gera uma grande variedade técnica e espacial.

Apropriando-se deste conceito, diversas linhas suburbanas pelo mundo começam a ser reestruturadas as redes de trem metropolitano. As principais medidas foram a separação dos serviços suburbanos dos serviços de longa distância e cargas; construção de interligações centrais, integrando linhas; e construção de novas linhas. Estas medidas levam à configuração de uma rede de trens suburbanos próxima de uma rede de metrô, o que gera as sobreposições tecnológicas e espaciais entre os dois modos.

Do exposto concluímos que, além da capacidade nominal das linhas, um aspecto central para que o sistema de transporte seja estrutural para aglomeração urbana em que se insere é sua organização em rede, da qual as conexões são os pontos cruciais. É essa forma de organização espacial que lhe garante não apenas a cobertura espacial mas também abre possibilidades de percursos. A este aspecto chamamos aqui de *estruturação da rede*, aspecto central das análises a seguir.

Indicadores para avaliação de redes

A partir deste ponto vamos analisar o potencial do uso de indicadores para a avaliação espacial das redes de alta capacidade, partindo do conceito de alta capacidade apresentado – uma *rede segregada e de linhas exclusivas*. A ideia é obter parâmetros quantitativos de avaliação

⁵ Trata-se de uma apropriação da categoria prototípica, que se diferencia da categoria clássica-aristotélica por possuir um núcleo (protótipo) e limites difusos, de modo que possa haver sobreposições entre categorias próximas (baseado em John TAYLOR, *Linguistic Categorization – Prototypes in Linguistic Theory*. Oxford: OUP. 2003).

da qualidade de uma rede, que podem ser utilizados tanto para análise de sistemas existentes quanto como parâmetro para novas propostas.

Serão apresentados três conjuntos de indicadores, visando a quantificação das características espaciais das redes de alta capacidade. Apesar de simples, quando aplicados em conjunto permitem uma leitura bastante rica.

Os primeiros indicadores são a extensão total da rede e a sua proporção em relação à população da aglomeração urbana (km/habitante).

O segundo conjunto busca caracterizar a forma da rede através da correlação entre o comprimento médio de linhas e o número de estações, conforme proposto por DERRIBLE & KENNEDY (2010). As redes podem ser classificadas quanto à natureza da cobertura espacial em três formas principais: cobertura local, acessibilidade regional, e cobertura regional.

O terceiro conjunto busca quantificar o nível de *estruturação interna da rede*, em dois subgrupos. Primeiro, os indicadores oriundos da Teoria dos Grafos (GATTUSO & MIRIELLO, 2005; DERRIBLE & KENNEDY, 2010), onde através da conversão de redes em grafos planares podemos calcular os índices de complexidade, conectividade e o número de seus 'loops'. Em seguida, o índice conexões por linha, elaborado como ferramenta para a pesquisa citada (ISODA, 2013) com resultados análogos aos índices dos grafos, com a vantagem da simplicidade de aplicação.

Extensão da rede

Estes indicadores, a extensão total da rede e a sua proporção em relação à população da aglomeração urbana, representam a ordem de grandeza do sistema e a relação com a população, mas abstraem os aspectos geométricos e a forma de distribuição da rede.

Resultam em informações de fácil leitura, motivo pelo qual são muito usados mas também frequentemente criticados.

Na tabela abaixo percebe-se um limite por volta dos 10 km/hab, abaixo do qual se encontram os casos latinoamericanos, com exceção de Santiago, com 15 km/hab. A rede de metrô de São Paulo possui o menor índice, num empate técnico com Buenos Aires. Se somada à rede da CPTM, passa a ter uma proporção similar à de Santiago e acima da Cidade do México. Podemos ver também que apesar de possuírem redes de metrô de extensão similar, Milão e São Paulo possuem populações completamente distintas, resultando em um índice de extensão de rede por habitantes drasticamente diferentes.

Tabela 1 – Quilometragem de rede por habitante

(Fonte: Ovenden, 2009; Sort, 2005)

	L (km)	pop (mi Hab)	L/pop
Londres	438.73	11.6	37.8
Paris	211.30	10.7	19.7
Berlim	151.70	4.3	35.3
Milão	74.60	4.3	17.3
Nova Iorque	368.05	15.8	23.3
Cidade do México	177.10	18.3	9.7
Buenos Aires	48.94	12.9	3.8
Santiago	94.20	6.1	15.4
São Paulo - Metrô	74.30	19.7	3.8
SP - Metrô + CPTM	335.10	19.7	17.0

Forma da rede

Aplicaremos aqui um par de índices espaciais para análise de redes de metrô proposto por DERRIBLE & KENNEDY (2010), que buscam caracterizar a forma e traçar diferentes modelos de rede. Entre as desvantagens estão a abstração da geometria da rede e a necessidade de definição de todas as estações (o que muitas vezes não ocorre em planos).

Do cruzamento do comprimento médio de linhas e do número de estações, os autores sugerem três formas de rede (vide gráfico): “cobertura local”, caracterizada por uma grande densidade central (muitas estações e linhas curtas); “acessibilidade regional”, o inverso, linhas longas e menor número de estações; e “cobertura regional”, que possui grande extensão e grande densidade de estações.

Tabela 2 – Número de estações e comprimento médio de linhas

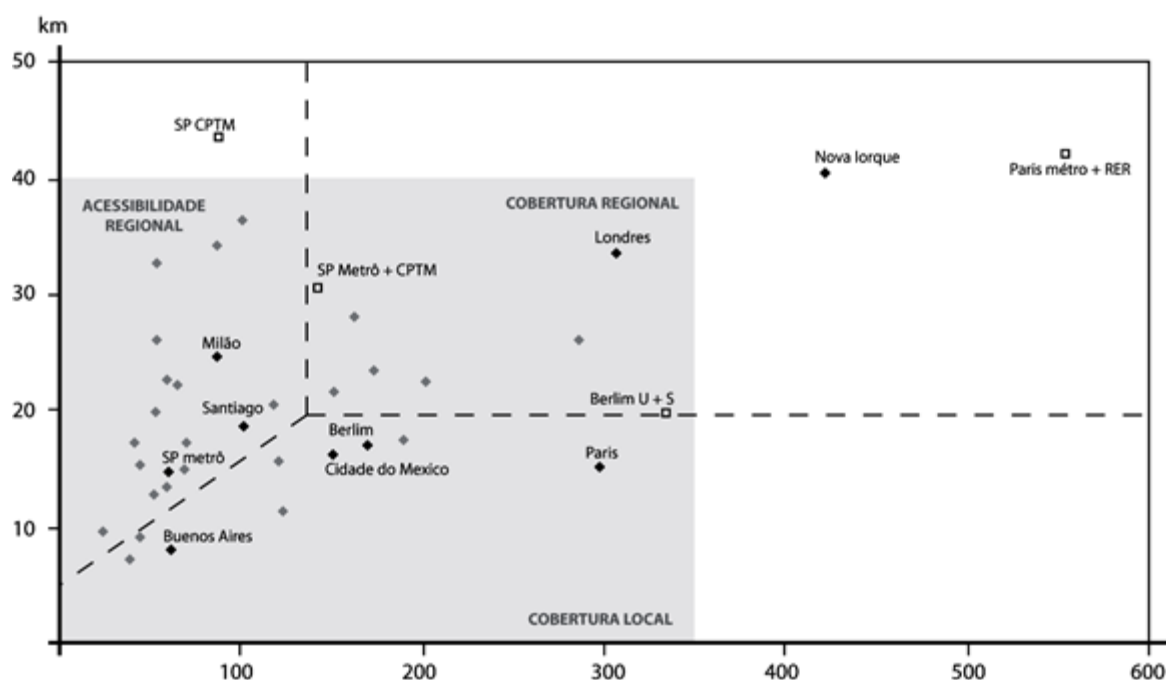
(Fonte: Derrible & Kennedy, 2010 / dados de São Paulo de autoria própria)

	Estações	Rede(km)	Linhas(L)	Média km/L
Londres	306	438.73	13	33.7
Paris	297	211.30	14	15.1
Paris Metro + RER	554	798.30	19	42.0
Berlim	170	151.70	9	16.9
Berlim U+S	336	483.20	24	20.1
Milão	87	74.60	3	24.9
Nova Iorque	422	368.05	9	40.9
Cidade do México	151	177.10	11	16.1
Buenos Aires	63	48.94	5	9.8
Santiago	101	94.20	5	18.8
São Paulo - Metrô	60	74.30	5	14.9
SP - CPTM	89	260.80	6	43.5
SP - Metrô + CPTM	142	335.10	11	30.5

Às redes analisadas por DERRIBLE & KENNEDY acrescentamos a rede de metrô de Santiago, de São Paulo (Metrô e CPTM), do RER de Paris e do S-Bahn de Berlim (quadrados vazados), na busca infrutífera por diferenciar formalmente as redes de metrô e trens de subúrbio. O gráfico original abrangia uma área menor (aqui hachurada) e excluía a rede de Nova Iorque (apesar de quantificada no estudo citado), evidenciando que ela é um caso excepcional (possui muitos compartilhamentos de via, o que contraria o princípio de *linhas independentes*, tornando-a um caso complicado de analisar). Mesmo casos considerados paradigmáticos como de Londres e Paris são casos extremos de seus grupos.

Figura 6 - Formas de Rede

(Fonte: autoria própria sobre Derrible & Kennedy, 2010)



Ao acrescentar as redes de trens, percebemos que estas também têm resultados diversos. A rede unificada de Berlim (U-Bahn + S-Bahn) fica ainda dentro dos limites da “cobertura local”, próximo à rede do Métro de Paris. Esta, por sua vez, quando somada à rede do RER torna-se um caso extremo da “cobertura regional”, ultrapassando o índice de Nova Iorque. O mesmo acontece com a rede da CPTM, que torna-se um caso extremo da “acessibilidade regional”, próximo à rede de metrô de Estocolmo e Washington. A rede da CPTM + Metrô localiza-se dentro da “cobertura regional”, próximo às redes de Shanghai, Moscou, Chicago e Tóquio.

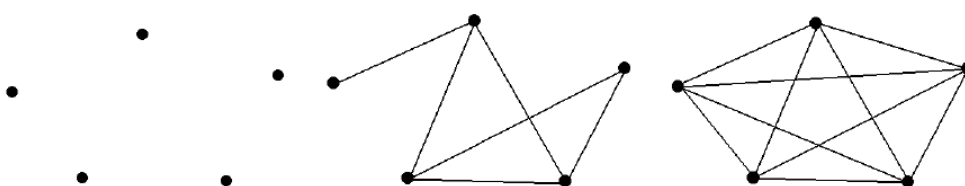
Podemos extrair daqui que, do ponto de vista da distribuição espacial: (1) há mais de um modelo de rede possível e (2) eles não distinguem os dois modos aqui estudados. De fato, as redes de trens testadas – CPTM, RER e S-Bahn – possuem características espaciais muito distintas.

Estruturação da rede – Grafos

O último conjunto de indicadores – teoria dos grafos⁶ e conexões por linha – buscam quantificar a forma de estruturação geométrica da rede, ou seja, o quanto as diferentes linhas se conectam entre si. A principal desvantagem destes indicadores é a abstração das proporções geográficas.

Figura 7 – Três exemplos de grafos

(Fonte: autoria própria)



Um grafo é composto essencialmente por vértices e arestas, também chamados de pontos e linhas ou nós e links. Uma aresta sempre conecta dois vértices. Se todas as ligações possíveis entre vértices forem realizadas, temos um grafo completo. Dependendo da necessidade os elementos podem ser complexificados, incluindo o peso do vértice (número de arestas que recebem); arestas com direção definida, chamadas arcos; etc. Os grafos também podem ser classificados em tipos diversos, dos quais interessa-nos distinguir apenas os grafos planares, onde a intersecção entre arestas gera um vértice (diferente dos exemplos acima). São utilizados para redes de transporte em diferentes escalas, da mais detalhada, representando cada fluxo possível de um sistema viário, com arcos conforme o sentido; até a macro, que será a utilizada aqui⁷.

⁶ Teoria dos grafos é um campo da matemática que visa a análise de problemas através de diagramas e é aplicado em áreas diversas como economia, biologia, química, psicologia; e também para a análise de redes físicas, como circuitos elétricos, redes de água ou transporte. Existem inúmeros livros introdutórios ao assunto, foi consultado o livro ORE & WILSON. *Graphs and their uses*. Yale: The Mathematical Association of America. 1990.

⁷ Existem aplicações mais avançadas de grafos, denominadas “redes complexas”, que não serão exploradas neste estudo. Destaco o artigo a seguir, que aplica indicadores de redes complexas na avaliação da robustez da rede

A conversão de redes de alta capacidade em um grafo para a análise macro é um procedimento bastante simples, basta converter as estações em vértices e os trechos entre estações em arestas. Seguimos a recomendação de DERRIBLE & KENNEDY (2010) de considerar como vértices apenas as estações terminais (peso 1) e de transferência (peso maior que 2)⁸.

Figura 8 – Grafo da rede de metrô de São Paulo 2011.
(Fonte: autoria própria)

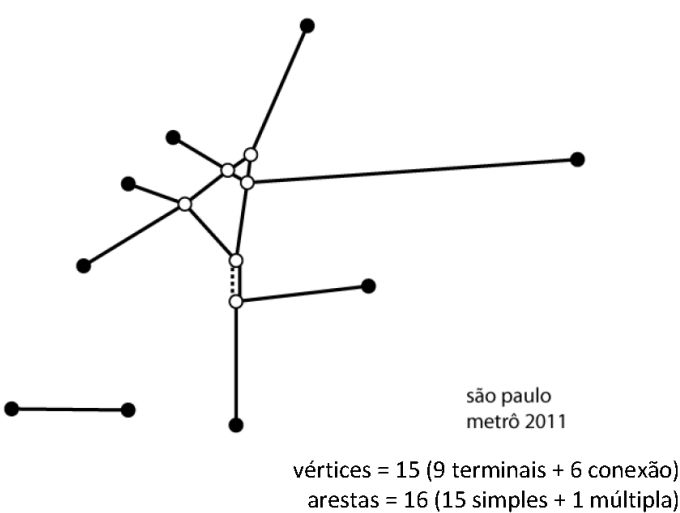


Tabela 3 – Índices da rede de metrô de São Paulo 2011
(Fonte: autoria própria)

	fórmula	SP 2011 metrô
Complexidade	a/v	$16/15 = 1,07$
Conectividade	$a/(3v-6)$	$16/(3*15-6) = 0,41$
Loops	$a-v+1$	$16-15+1 = 2$

Inicialmente foram calculados os índices sobre o grafo da rede do metrô de São Paulo de 2011, tomando-a como atual, pois após essa data não tivemos alterações significativas. A partir dele

de metrô de Beijing: YANG, Yuhao (et. al.). “Robustness assessment of urban rail transit based on complex network theory: A case study of Beijing Subway.” In: *Safety Science* 79. Elsevier. 2015.

⁸ Para mais detalhes, conferir DERRIBLE & KENNEDY (2010), e também GATTUSO & MIRIELLO (2005). Estes últimos fazem o mesmo tipo de análise utilizando todas as estações das redes (vértices de peso 2), obtendo resultados numericamente diferentes, mas relativamente similares.

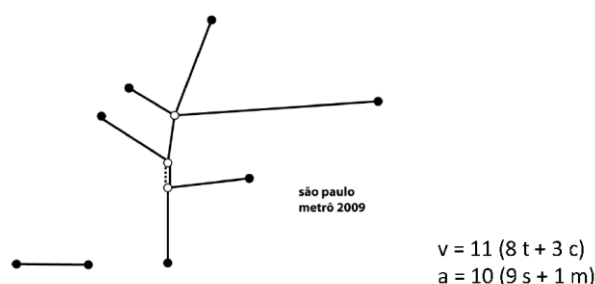
calculamos os índices de *complexidade*, *conectividade* e o número de *loops*, conforme as fórmulas abaixo⁹. Salta aos olhos o trecho isolado que representa a linha 5 – Lilás, que a rigor deveria ser descartado pois sequer se conecta à rede e por isso provoca uma queda em todos os índices, principalmente no número de loops (contribui com -1 *loop*).

1. Complexidade = a/v
2. Conectividade = $a/(3v-6)$
3. Loops = $a-v+1$

Os índices poderiam desconsiderar vértices múltiplos ou conexões adjacentes (como ocorre no trecho Paraíso - Ana Rosa) pois na prática acrescentam pouco à estruturação das redes, o que resultaria em índices menores. No entanto, adotamos o método utilizado pelos autores de referência para permitir a comparabilidade com índices por eles calculados. Em redes com grande complexidade este tipo de distorção tende a se diluir.

Em seguida foram analisadas as redes de alta capacidade de São Paulo (somente Metrô e Metrô + CPTM) em 2009 e 2011 (período em que foram inauguradas as conexões em Tamandateí e Pinheiros, que trouxeram mudanças significativas na estruturação da rede). Os resultados dos índices pode ser vista na tabela a seguir, comparados a outras cidades.

Figura 9 – Grafo da rede do Metrô de São Paulo 2009
(Fonte: autoria própria)



⁹ Estes índices são triviais na Teoria dos Grafos e sua dedução está disponível em livros.

Figura 10 – Grafo da rede de alta capacidade de São Paulo 2009
(Fonte: autoria própria)

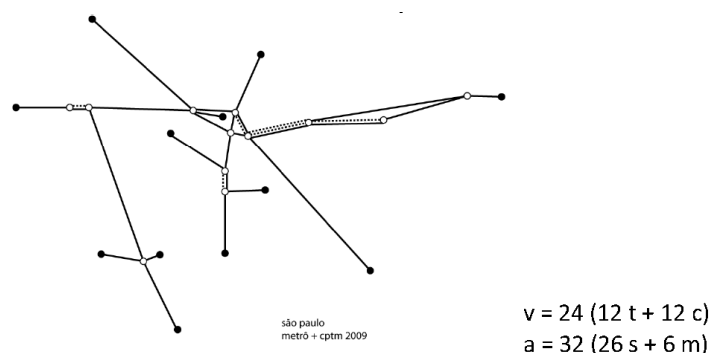


Figura 11 – Grafo da rede de alta capacidade de São Paulo 2011
(Fonte: autoria própria)

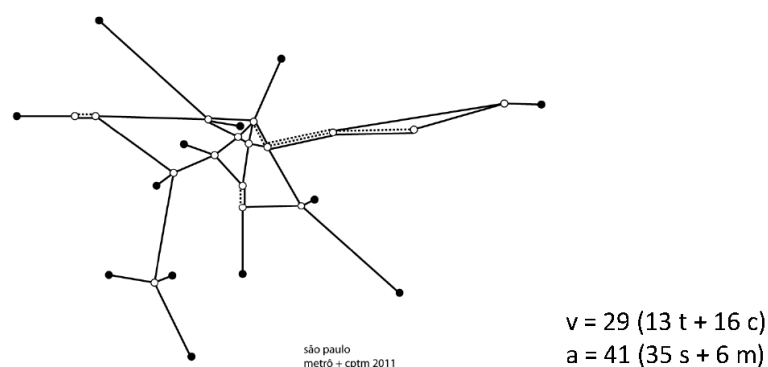


Tabela 4 – Índices de complexidade, conectividade e loops

(Fonte: Derrible & Kennedy, 2010; exceto dados de São Paulo)

	vértices	arestas	complex.	conect.	loops
Londres	83	155	1,87	0,64	73
Paris	77	137	1,78	0,61	61
Berlim	32	45	1,41	0,50	14
Nova Iorque	73	130	1,78	0,61	58
Barcelona	29	44	1,52	0,54	16
Milão	14	15	1,07	0,42	2
Cid. do México	35	47	1,34	0,47	13
Buenos Aires	12	13	1,08	0,43	2
SP 2009 metrô	11	10	0,91	0,37	0
SP 2011 metrô	15	16	1,07	0,41	2
SP 2009 metrô + trem	24	32	1,33	0,48	9
SP2011 metrô + trem	29	41	1,41	0,51	13

Podemos dividir os casos em uma faixa mais alta de índices de complexidade (acima de 1,5) e também de conectividade (acima de 0,5). De modo geral, na faixa superior localizam-se os

casos europeus e o estadunidense, enquanto na faixa inferior estão os casos latino-americanos. Destacam-se novamente os casos de Londres, Paris e Nova Iorque como casos extremos nos três índices e são exceções Berlim e Milão, que são cidades de porte menor que as demais, como verificamos o item 3.2.

Na faixa inferior temos a Cidade do México com os maiores índices, só alcançados por São Paulo quando considerada a rede ferroviária completa. Quando considerada isoladamente, a rede de metrô de São Paulo tem os menores índices.

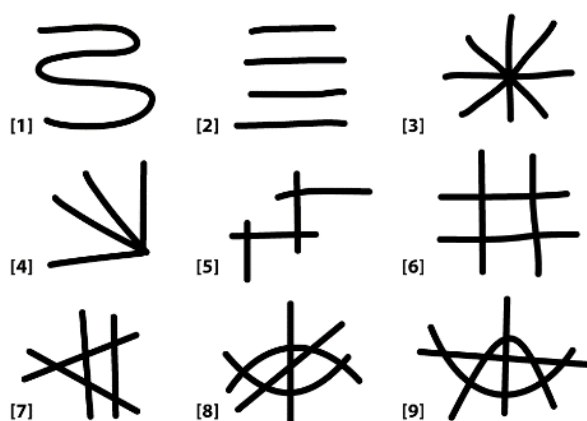
Estruturação da rede – Conexões por linha

Buscando uma análise rápida da estruturação de uma rede criamos o índice de conexões por linha (c/L), que pode ser calculado sobre qualquer mapa simples de rede. A principal dificuldade é pressupor linhas operacionalmente, não contemplando ramais ou compartilhamentos de via (abrem mão do conceito de linhas exclusivas).

Para a elaboração do indicador, testamos redes hipotéticas supondo uma mesma extensão de linhas sobre uma mesma área.

Figura 12 - Redes hipotéticas para testes do índice de conexões por linha

(Fonte: autoria própria)



Os dois primeiros casos são limites: [1] uma única linha que “serpenteasse” com grandes “percursos negativos”; e [2] linhas completamente isoladas não constituindo uma rede, ambas sem conexões. As hipóteses seguintes são a radial [3] e sua variação excêntrica, a “pé-de-galinha” [4], que convergem para um único foco. Na hipótese seguinte, de linhas “penduradas” [5], cada linha se conecta apenas à uma linha. Apesar de parecerem esdrúxulas, estas três hipóteses são baseadas em casos concretos. Com uma rede do tipo “malha” [6] temos uma distribuição regular das linhas e conexões, resultando em um número de conexões igual ao de linhas. É importante ressaltar que ao fechar um *loop* o índice atingiu valor 1. Criando linhas curvas ou em diagonal é possível maximizar os *loops*, como vemos nas hipóteses [7], [8] e [9], resultando índices maiores que 1.

Tabela 5 – Hipóteses de rede para conexões por linha

(Fonte: autoria própria)

Hipótese	conexões	linhas	c/L
1	0	1	0,00
2	0	4	0,00
3	1	4	0,25
4	1	4	0,25
5	3	4	0,75
6	4	4	1,00
7	5	4	1,25
8	7	4	1,75
9	9	4	2,25

O objetivo deste índice é uma análise similar aos índices dos grafos. Esta correlação foi verificada pelo cruzamento do índice de conexões por linha com o índice de complexidade, cuja regressão linear resultou satisfatória, conforme gráfico a seguir (também foi testado com o índice de conectividade, com resultados similares como era de se esperar, uma vez que ambos possuem uma forte correlação como demonstrado por GATTUSO & MIRIELLO, 2005).

Figura 13 - Relação entre índices de complexidade e conexões por linha

(Fonte: autoria própria)

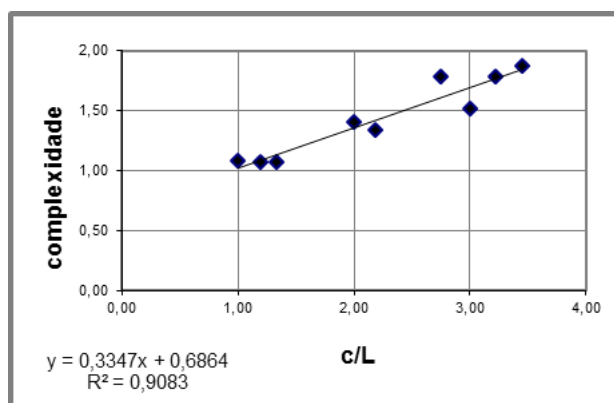


Tabela 6 – Relação entre os índices de estruturação da rede

(Fonte: autoria própria sobre Derrible & Kennedy, 2010)

	complex.	conect.	conexões	linhas	c/L
Londres	1,87	0,64	38	11	3,45
Paris	1,78	0,61	45	14	3,21
Berlim	1,41	0,50	18	9	2,00
Nova Iorque	1,78	0,61	14	7	2,75
Barcelona	1,52	0,54	15	5	3,00
Milão	1,07	0,42	4	3	1,33
Cidade do México	1,34	0,47	24	11	2,18
Buenos Aires	1,08	0,43	6	6	1,00
São Paulo	1,07	0,41	6	5	1,20

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Apresentaremos aqui uma série de aplicações do índice de conexões por linha visando testar o seu potencial e, simultaneamente, complementar o panorama de redes mundiais iniciado pelos autores supracitados (SORT, 2005; GATTUSO & MIRIELLO, 2005; DERRIBLE & KENNEDY, 2010). As séries históricas são apoiadas em mapas de informação aos usuários compilados em OVENDEN (2007). Em seguida analisaremos a rede do Metrô e da CPTM e alguns planos para São Paulo, que contarão com uma avaliação conjunta dos índices apresentados.

Séries históricas – Mundo

Aplicamos o indicador de conexões por linha para as redes de metrô da Cidade do México (1969), Santiago (1975), Buenos Aires (1913) e Paris (1900). Priorizamos os casos latino-americanos pois são menos explorados pela literatura e possuem contextos socioeconômicos que se assemelham ao brasileiro, sendo por isso de grande interesse. A exceção é o caso parisiense, que consideramos prototípico. Para cada caso foram destacados as datas em que ocorreram alterações nas redes que resultassem em mudanças significativas no indicador.

Figura 14 – Metrô da Cidade do México 1972 e 1989

(Fonte: autoria própria)

1972 – 3 conexões e 3 linhas



1989 – 12 conexões e 7 linhas

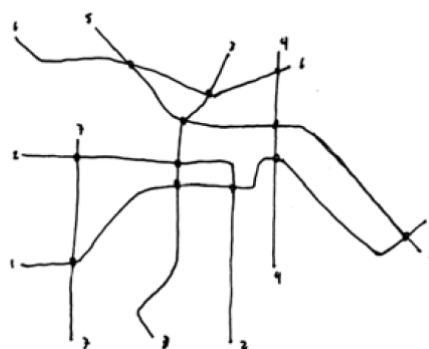


Tabela 7 – Índice de conexões por linha para Metrô da Cidade do México

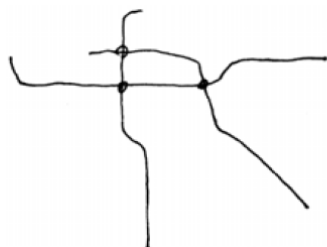
(Fonte: autoria própria)

Rede de Metrô 1972	$3/3 = 1,00$
Rede de Metrô 1989	$12/7 = 1,80$
Rede de Metrô 2011	$23/11 = 2,05$

Figura 15 – Metrô de Santiago do Chile 2000 e 2009

(Fonte: autoria própria)

2000 – 3 conexões e 3 linhas



2009 – 7 conexões e 5 linhas



Tabela 8 – Índice de conexões por linha para Metrô de Santiago

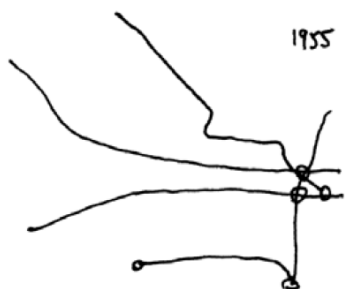
(Fonte: autoria própria)

Rede de Metrô 2000	$3/3 = 1,00$
Rede de Metrô 2009	$7/5 = 1,40$
Rede de Metrô 2011	$8/5 = 1,60$

Figura 16 – Metrô de Buenos Aires 1955 e 2011

(Fonte: autoria própria)

1955 – 4 conexões e 5 linhas



2011 – 6 conexões e 6 linhas



Tabela 9 – Índice de conexões por linha para Metrô de Buenos Aires

(Fonte: autoria própria)

Rede de Metrô 1955	$4/5 = 0,80$
Rede de Metrô 2011	$6/6 = 1,00$

Figura 17 – Índice de conexões por linha para Metrô de Paris 1910

(Fonte: autoria própria)

1910 – 12 conexões e 6 linhas



Tabela 10 – Índice de conexões por linha para Metrô de Paris

(Fonte: autoria própria)

Rede de Metrô 1910	$12/6 = 2,00$
Rede de Metrô 1918	$19/9 = 2,11$
Rede de Metrô 2011	$45/14 = 3,21$

É perceptível que as redes apresentadas buscam uma boa estruturação (índice acima de 1,00). Cidade do México supera de partida este valor enquanto Santiago e Buenos Aires se mantêm em torno dele. Paris, por sua vez, já inicia com um índice de 2,00 e o supera ao longo dos anos.

São Paulo

Apresentaremos a seguir uma série histórica do índice de conexões por linha para a evolução histórica da rede e os planos não realizados para São Paulo, iniciando com a inauguração do Metrô em 1974. Para manter a comparabilidade, consideraremos a rede da CPTM com a mesma divisão em 6 linhas atuais, pois ainda que tenham ocorrido subdivisões operacionais a rede permanece a mesma. Assim como nos grafos, as conexões justapostas aliadas à exiguidade da rede provoca grande alteração nos índices. Quando controversos, apresentamos os dados de menor valor entre parênteses.

Figura 18 – Índice de conexões por linha para Metrô de São Paulo 1997 e 2010

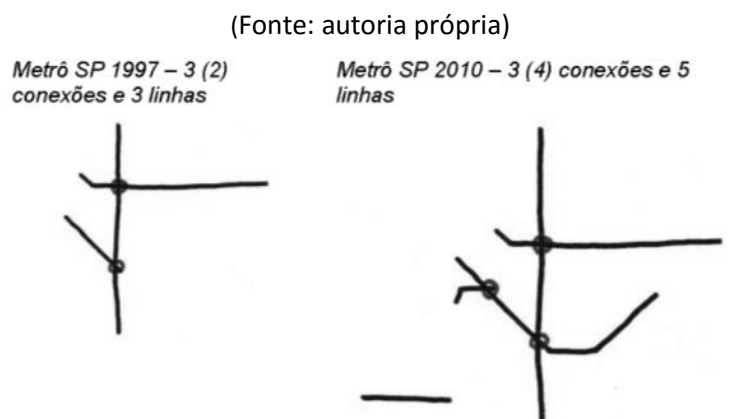


Tabela 11 – Índice de conexões por linha para São Paulo

(Fonte: autoria própria)

Ano	Metrô		Metrô + CPTM	
1974	$1/2 = 0,50$		$9/8 = 1,13$	$(5/8 = 0,63)$
1997	$3/3 = 1,00$	$(2/3 = 0,67)$	$11/9 = 1,22$	$(7/9 = 0,78)$
2009	$3/4 = 0,75$	$(2/4 = 0,50)$	$12/10 = 1,20$	$(9/10 = 0,90)$
2010	$4/5 = 0,80$	$(3/5 = 0,60)$	$14/11 = 1,27$	$(12/11 = 1,09)$
2011	$6/5 = 1,20$	$(5/5 = 1,00)$	$16/11 = 1,45$	$(13/11 = 1,18)$

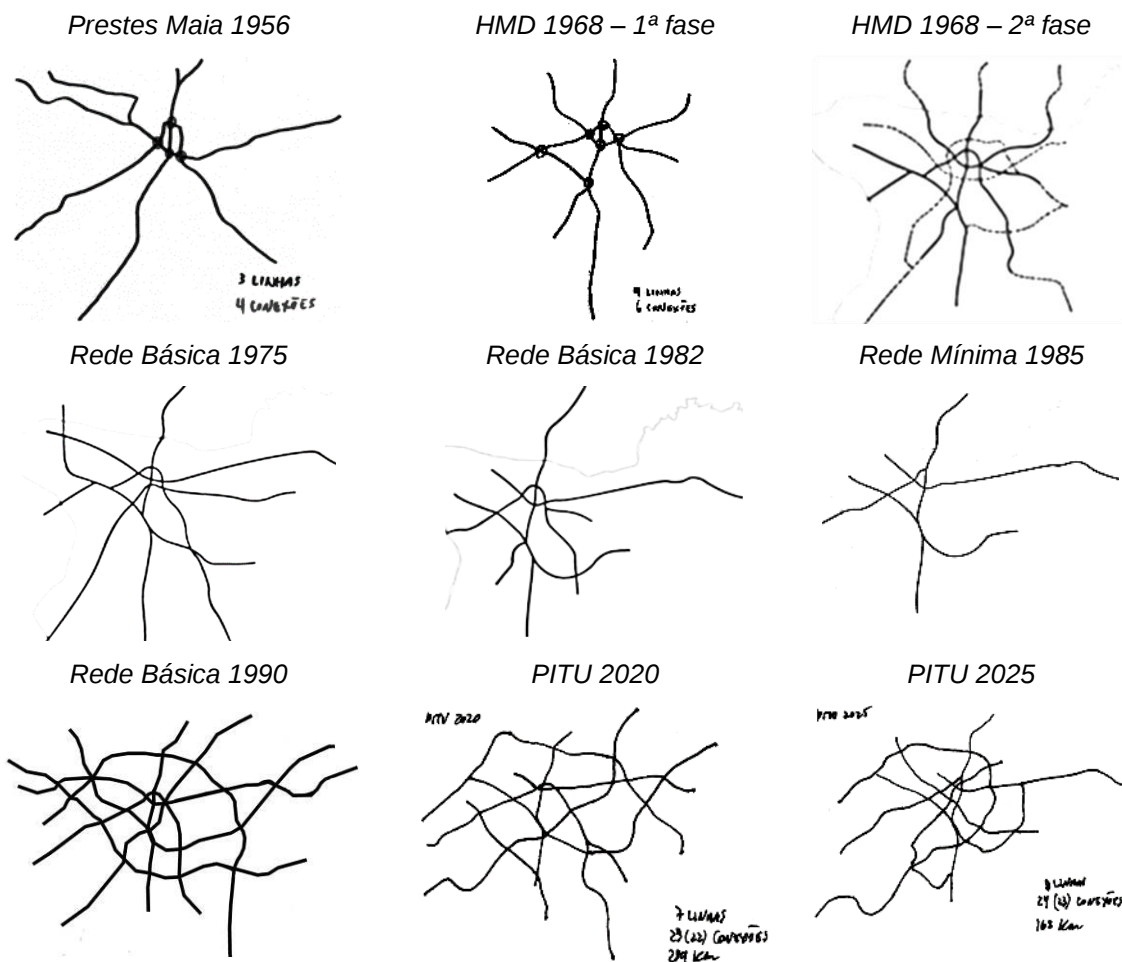
O desenho da rede de metrô radial e sem formação de *loops* resulta num c/L abaixo de 1 durante várias décadas. Essa situação se alterou somente com a inauguração do trecho central da linha 4 – Amarela em 2011.

Se consideradas conjuntamente, a rede de Metrô e da CPTM começam a configurar uma rede razoável, o que se verifica pelo índice de 1,45. Mas, apesar de uma quilometragem total alta (335 km), ela não se estrutura tão bem se comparadas às redes de metrô apenas de Santiago ou Cidade do México, que com menor extensão (94 km e 177 km, respectivamente) conseguem melhores índices (1,60 e 2,05). Percebemos que até muito recentemente os índices para a rede conjunta de Metrô + CPTM eram baixos devido ao limitado número de conexões entre elas. Isso se deve em partes pela CPTM se basear em uma rede preexistente construída para transporte de cargas e portanto não estar necessariamente bem inserida na

aglomeração urbana, em parte pelo não cumprimento dos planos subsequentes, como veremos a seguir.

Figura 19 – Índice de conexões por linha para planos do Metrô de São Paulo

(Fonte: autoria própria sobre HMD (1969); Metrô (1986); Deák (1999); STM (1999); STM (2006))



Ainda que com diferenças qualitativas, percebemos que os planos de rede apresentados para o Metrô de São Paulo analisados tinham em mente a formação de uma rede bem estruturada ($c/L > 1$), fato que só se consumou em 2011 (onde atingimos aproximadamente a Rede Mínima de 1985, o índice mais baixo dentre os apresentados). Os dois projetos mais antigos (Prestes Maia e HMD) já atentavam para essa necessidade de estruturar uma rede, pois possuíam um bom número de conexões na região central.

Tabela 12 – Índice de conexões por linha para planos do Metrô de São Paulo

(Fonte: autoria própria)

Prestes Maia (1956)	$4/3 = 1,33$
HMD (1968) 1a fase	$6/4 = 1,50$
HMD (1968) 2a fase	$19/7 = 2,71$
Rede Básica 1975	$11/5 = 2,20$
Rede Básica 1982	$8/4 = 2,00$
Rede Mínima 1985	$5/4 = 1,25$
Rede Básica 1990	$21/7 = 3,00$
PITU 2020 (1998)	$23/7 = 3,28$
PITU 2025 (2006)	$24/8 = 3,00$

São Paulo – Expansões recentes

Por fim, faremos uma análise das linhas atualmente em execução ou licitadas para obras independente do seu status atual, quantificando o quanto a inserção de cada uma dentro da rede contribui para a sua estruturação interna. Para fins práticos, consideramos a rede atual admitindo a finalização das duas obras mais avançadas, a fase 2 da Linha 4 – Amarela até Vila Sônia e a extensão da Linha 5 – Lilás até Chácara Klabin. Deste modo a rede de alta capacidade parte com um indicador de conexões por linha de 1,63, valor nunca atingido durante a evolução da rede.

Ainda que controversas, foram englobadas as linhas de monotrilho por serem consideradas pelo Governo do Estado como integrantes da rede. A Linha 15 – Prata não foi considerada inaugurada uma vez que possui apenas uma estação em operação assistida. Para cada linha será apontada qual a sua contribuição para a rede e o índice resultante.

Figura 20 – Linhas atualmente em construção ou licitadas 2017

(Fonte: autoria própria)

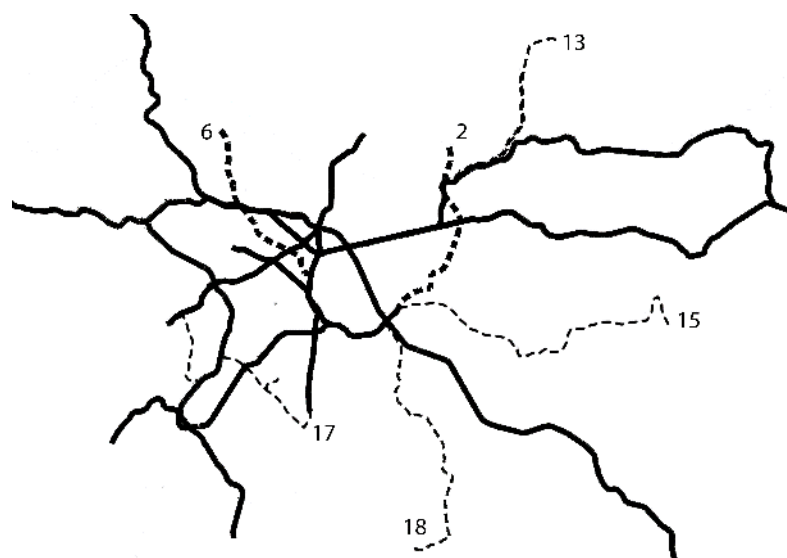


Tabela 13 – Índice de conexões por linha para as linhas em construção em São Paulo

(Fonte: autoria própria)

	Conexões	Linhas	c/L
Metrô	8	5	$8/5 = 1,60$
Metrô + CPTM	18	11	$18/11 = 1,63$
Linha 15 – Prata	+1	+1	$19/12 = 1,58$
Linha 17 – Ouro	+4	+1	$22/12 = 1,83$
Linha 6 – Laranja	+3	+1	$21/12 = 1,75$
Linha 2 – Verde	+2	0	$20/11 = 1,81$
Linha 13 – Jade	+1	+1	$19/12 = 1,58$
Linha 18 – Bronze	+1	+1	$19/12 = 1,58$
TOTAL	18+12	11+5	$30/16 = 1,88$

As linhas de monotrilho 15 – Prata e 18 – Bronze possuem a mesma característica, são linhas radiais e periféricas com uma estação terminal de conexão com a rede e se estendem na outra extremidade, o que acarreta em um fluxo altamente pendular. Isso se expressa na contribuição de +1 linha e +1 conexão, ou seja, não traz melhoria ao indicador de estruturação da rede. Para ambos os casos, o indicador melhoraria se fosse considerada a linha de BRT de Jabaquara a São Mateus. A linha 15 poderia atenuar seu problema com a proposta posterior

de extensão até a estação Ipiranga da Linha 10. Ambas as linhas acabam por desempenhar o papel de alimentadoras da rede estrutural. Da mesma forma, a Linha 13 – Jade possui apenas uma conexão em sua estação terminal, o que pode ser justificado por priorizar o serviço especial de atendimento ao aeroporto.

As demais linhas acrescentam mais conexões à rede, como os indicadores demonstram. A extensão da Linha 2 – Verde até a Dutra acrescenta duas conexões e não acrescenta linhas novas, enquanto as linhas 6 – Laranja e 17 – Ouro se inserem de modo a cruzar diversas linhas existentes, aumentando significativamente o índice.

Comparando os indicadores de cada linha e o indicador total, percebemos que mesmo com a implantação de 6 novos trechos na rede, totalizando 16 linhas, ainda não atingimos o índice 2,00. Cabe ressaltar que as linhas de caráter mais pendular, além de não contribuírem para a estruturação da rede, também são de caráter mais periférico e estão localizadas na metade leste da aglomeração urbana, recorrentemente menosprezada na história das políticas urbanas.

São Paulo - Planos Recentes

Apresentaremos uma leitura dos planos recentes para a rede de alta capacidade da RMSP utilizando o conjunto de indicadores apresentado. As redes de metrô propostas possuem diferentes modelos, variando de uma rede central e densa a uma aberta e abrangente, o que transparece nos índices¹⁰. Paralelamente, varia a relação com a rede de trens metropolitanos, que ora se distinguem radicalmente e ora convergem para uma rede comum.

¹⁰ As propostas para a rede da CPTM não variam muito em sua extensão física e nem sempre são precisas em seus limites, o que impossibilita o cálculo dos índices. Por esse motivo foram calculados os indicadores para as redes de metrô apenas.

Figura 21 – Rede atual da RMSP

(Fonte: autoria própria)



Além da rede atual, serão analisadas as principais redes propostas e avaliadas pelos planos recentes: *Plano Integrado de Transportes Urbanos para 2020* (Pitu 2020); *Rede Essencial /Plano Integrado de Transportes Urbanos para 2025* (Pitu 2025); e *Atualização da rede metropolitana de alta e média capacidade de transporte da RMSP* (Rede 2030).

O Pitu 2020 apresenta três propostas conceitualmente distintas de rede e, através de uma extensa análise de indicadores, seleciona a Rede Aberta como a mais adequada para o cenário futuro desejado. Um processo de seleção similar é feito no estudo *Rede Essencial*, autodeclarada uma continuação do Pitu 2020, mas os indicadores da avaliação são alterados e simplificados, o que leva a um resultado conceitualmente inverso, uma rede mais central e compacta. Por fim ainda substitui a rede selecionada por uma versão sua mais enxuta, a chamada Rede Essencial. O Pitu 2025 possui apenas duas propostas de rede similares entre si e, após uma avaliação de indicadores similar ao do Pitu 2020 que resulta em empate técnico, escolhe como “preferida” a Rede Essencial, já apresentada na publicação homônima¹¹. A proposta mais recente é a Rede 2030, que retorna para um modelo de rede ampla, mas distinta da Rede Aberta. O resultado dos indicadores está apresentado no quadro.

¹¹ Uma avaliação mais extensa destes planos e outros contemporâneos, incluindo análises das propostas e dos métodos de avaliação utilizados, está apresentada em ISODA (2013), capítulo 6.

Figura 22 – Proposta do PITU 2020 – Rede Aberta

(Fonte: autoria própria sobre STM, 1999)



Figura 23 – Rede do PITU 2025/Rede Essencial

(Fonte: autoria própria sobre STM, 2006)



Figura 24 – Rede de alta capacidade para 2030

(Fonte: elaborado sobre STM, 2013)

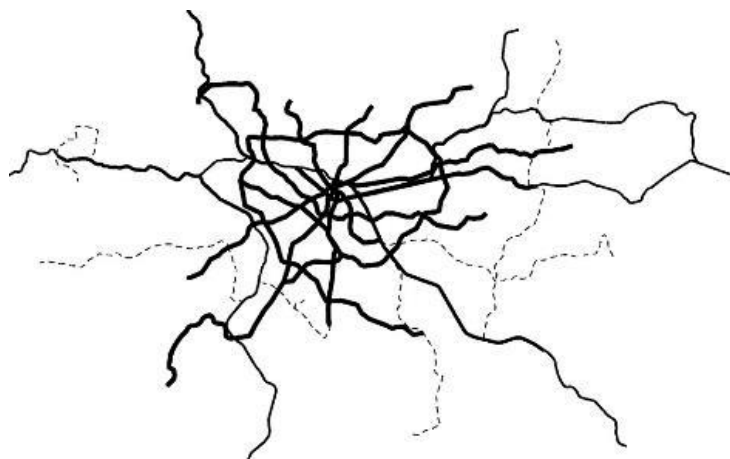


Tabela 14 – Índices dos planos recentes para o Metrô de São Paulo

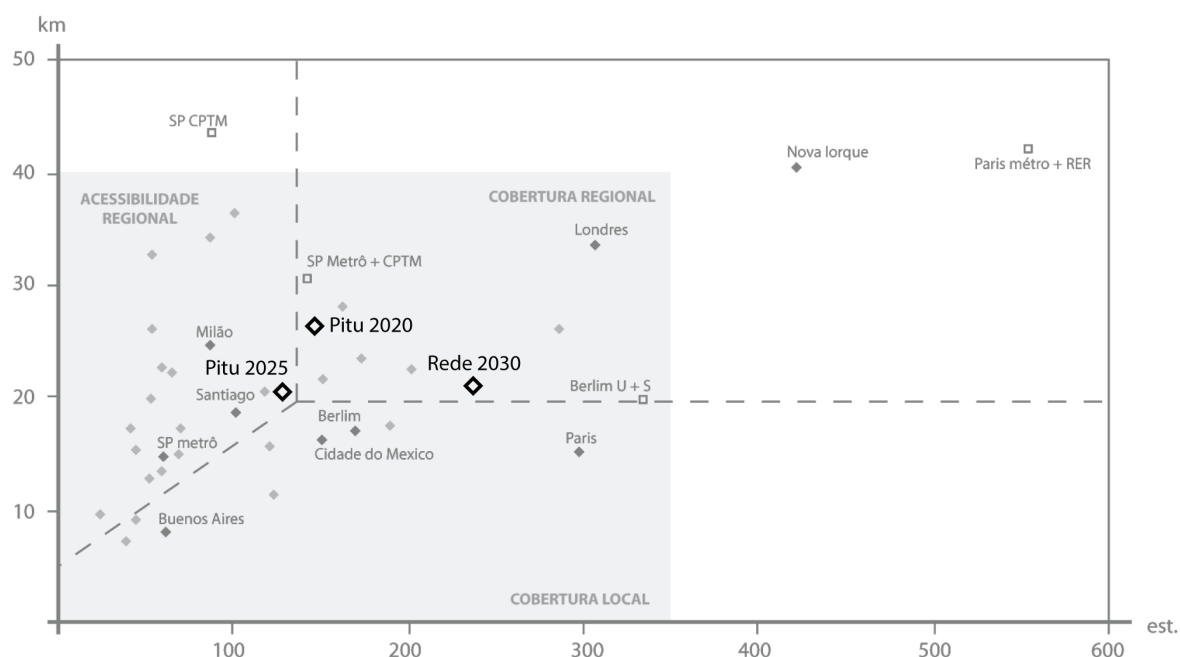
(Fonte: autoria própria)

Rede	Ano Horizonte	Linha média	Estações	Km/mi hab	Complexidade	c/L
Atual - Metrô	2013	14,8	63	3,7	1,07	1,2
Atual - Metrô + CPTM	2013	30,4	147	16,7	1,41	1,5
Pitu 2020 Rede Aberta	2020	26,3	145	10,6	1,41	2,6
Pitu 2025 - Rede Essencial	2020	20,4	128	7,3	1,50	3,0
Rede 2030	2030	22,9	236	11,0	1,53	2,9

Pelos índices de complexidade e de conexões por linha (c/L) percebemos que todos os planos procuram criar uma rede mais estruturadas do que a atual (índices acima de 1,4 e 2,5, respectivamente), similares a algumas das grandes metrópoles mundiais. Estes indicadores apontam para o nível de estruturação interna da rede, mas não permitem uma definição de modelos de rede. Para essa análise utilizamos a categorização de formas de rede, a partir do número de estações e do comprimento médio de linhas.

Figura 25 – Formas de rede dos planos recentes para o Metrô de São Paulo

(Fonte: autoria própria sobre Derrible & Kennedy, 2010)



Pelo gráfico percebemos que as três propostas apresentam modelos distintos, porém numa gama de variação sutil dentro do universo previamente apresentado.

O comprimento médio de linhas se mantêm por volta dos 20 Km, o que permite discutir objetivamente modelos de rede, como vemos nos casos mundiais: 15,1 para Paris; 33,7 para Londres; 40,9 para Nova Iorque; 16,1 para Cidade do México; e 9,8 para Buenos Aires.

O índice de quilometragem de rede por milhão de habitantes gira em torno de 10, nenhuma das propostas se aproxima dos índices das grandes metrópoles mundiais, que giram em torno de 20-30 km/mi hab (Londres, Paris, Berlim, Nova Iorque). É importante lembrar que este é o único dos índices utilizados que leva em consideração a aglomeração urbana.

Este conjunto de indicadores permite perceber que: (1) há variação nos modelos de rede propostos; (2) ainda que apresentem redes mais bem estruturadas do que a atual, em geral não propõe um patamar desejável para uma das maiores metrópoles do planeta; e (3) caso alguma das propostas houvesse sido implantada em sua totalidade, teríamos uma rede mais eficiente do que a existente.

A despeito da existência destes planos nas últimas duas décadas, não foi construído nas últimas duas décadas praticamente nada que não estivesse previsto nos planos anteriores à década de 1990. A exceção são as linhas de monotrilho, que não constavam nos planos apresentados. Mesmo nos períodos de maior investimento – como foram as décadas de 2000 a 2010 – as ações ainda são irrisórias perante a dimensão dos problemas diagnosticados e das soluções propostas pelos planos.

CONCLUSÕES

Dado o alto custo de implantação dos sistemas de transporte de alta capacidade, existe a necessidade de utilizar métodos que busquem quantificar o seu desempenho. Os índices apresentados procuram dar uma leitura simples e direta para fatores específicos. A proporção de rede por habitante representa de alguma maneira o quanto a rede pode atender da população, abstraindo completamente os aspectos espaciais; a complexidade e a conectividade das redes permite avaliar a qualidade da articulação espacial da rede, porém abstrai completamente a aglomeração urbana. Cabe destaque para o uso de índices para quantificar aspectos espaciais das redes, aspecto pouco explorado ainda, seja pela literatura científica, seja no campo prático.

Acreditamos no potencial analítico e propositivo destes índices, cujo uso foi esboçado neste estudo. No entanto, deles não se extrai nenhuma indicação para a distinção entre os modos ou o estabelecimento de modelos de organização de rede, objetivo inicial do estudo. Pelo contrário, vimos que é possível haver mais de um modelo de rede para ambos os modos.

Do exposto fica a conclusão de que, se não é possível extrair modelos a serem seguidos, os índices se prestam muito bem à avaliação de redes existentes ou propostas. Através destes índices é possível estabelecer padrões de serviço desejáveis, como uma quilometragem de rede por habitante ou um padrão de estruturação espacial da rede. Por trás de tudo isso está a busca por analisar racionalmente fenômenos que são sociais, econômicos e culturais, que possuem componentes que nem sempre são exatos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. *Capacidade do Transporte Urbano de Passageiros Sobre Trilhos*. São Paulo, Metrô. 2005. Manual Técnico.
- COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. *Evolução da Rede Básica do Metrô: 1968-1985*. São Paulo: Metrô, 1986.
- COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. *Rede Essencial: Trechos Prioritários*. São Paulo: Metrô. 2006.
- DEÁK, Csaba. “Elementos de uma política de transportes para São Paulo”, in: DEÁK, Csaba & SCHIFFER, Sueli (org.). *O Processo de Urbanização no Brasil*. São Paulo: Edusp, 1999.
- DERRIBLE, Sybil & KENNEDY, Christopher. “Characterizing metro networks: state, form, and structure”, in: *Transportation* 37. 2010.
- GARCIA, Moreno Zaidan. *Rede de transporte de massa e espaço urbano: um ensaio de traçado para São Paulo à luz das experiências de Londres e Paris*. São Paulo: Dissertação de Mestrado FAUUSP. 2014.
- GATTUSO, Domenico & MIRIELLO, Ernesto. “Compared Analysis of Metro Networks Supported by Graph Theory”, in: *Networks and Spatial Economics*, 5. Springer, 2005.
- GUTIERRES, Dionísio Matrigani & SANTOS, Leonardo Cleber Lisboa. “A Influência da Conectividade na Configuração da Rede Metroferroviária e No Desenvolvimento da Cidade”. Artigo apresentado à *20ª Semana de Tecnologia Metroferroviária*. 2014.
- HOCHTIEF, MONTREAL, DECONSULT (HMD) / COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. *Metrô de São Paulo*. São Paulo: Cia. do Metropolitano. 1969. 2v.

- ISODA, Marcos Kiyoto de Tani e. *Transporte sobre trilhos na Região Metropolitana de São Paulo: estudo sobre a concepção e a inserção das redes de transporte de alta capacidade*. São Paulo: Dissertação de Mestrado FAUUSP. 2013.
- OVENDEN, Mark. *Paris Underground*. London: Penguin. 2009.
- OVENDEN, Mark. *Transit Maps of the World*. London: Penguin. 2007. 2ed.
- SÃO PAULO (Estado), Secretaria de Estado dos Transportes Metropolitanos. *Pitu 2020: Plano Integrado de Transportes Urbanos para 2020*. São Paulo: STM, 1999.
- SÃO PAULO (Estado), Secretaria de Estado dos Transportes Metropolitanos. *Pitu 2025: Plano Integrado de Transportes Urbanos para 2025*. São Paulo: STM, 2006.
- SÃO PAULO (Estado), Secretaria de Estado dos Transportes Metropolitanos. *Atualização da rede metropolitana de alta e média capacidade de transporte da RMSP*. São Paulo: STM, 2013.
- SORT, Jordi Juliá. *Redes Metropolitanas (Metropolitan Networks)*. Barcelona: Gustavo Gili. 2005.
- VUCHIC, Vukan. *Urban Transit: Systems and Technology*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- VUCHIC, Vukan. *Urban Transit: Urban transit: Operations, Planning and Economics*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.