

O DESENVOLVIMENTO DAS REDES DE METRÔ

THIAGO ALVES MOREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM PLANEAMENTO E PROJECTO URBANO

Orientador: Álvaro Fernando de Oliveira Costa

JUNHO DE 2023

MESTRADO EM PLANEAMENTO E PROJECTO URBANO 2021/2022 - FEUP / FAUP

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ mppu@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Planeamento e Projecto Urbano - 2021/2022 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e Faculdade de Arquitetura Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2022.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrônica fornecida pelo respetivo Autor.

Este documento foi escrito no idioma Português do Brasil.

Aos meus Pais À minha família, minha futura esposa Micaela e amigos, que sempre me apoiaram nesta jornada.

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois, o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar”.

Josué 1:9

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer ao meu orientador, Professor Álvaro Costa, por me ter ajudado com a sua experiência e pela motivação dada ao longo do trabalho.

Aos meus pais, que foram os alicerces durante o meu percurso académico e que sempre me apoiaram e ajudaram no que lhes foi possível.

À minha namorada, Micaela Assis, agradeço a paciência e toda ajuda neste processo. Foste um pilar fundamental neste percurso.

Agradeço as Oficiais e Praças da Polícia Militar do Estado de São Paulo, que me apoiaram durante as licenças necessárias para a realização e conclusão deste mestrado.

Por fim, à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, que me proporcionou a oportunidade de realizar esta dissertação de mestrado.

RESUMO

A ideia deste trabalho de Mestrado é apresentar o desenvolvimento das redes de metrô, buscando entender o como funciona o planejamento e desenvolvimento das redes de metrô. O trabalho inicia explicando a existências das cidades, compreendendo as dinâmicas sociais e antropológicas que interfere na distribuição do tecido urbano.

No planejamento das cidades e da mobilidade foi destacado a teoria do arquiteto Christopher Alexander que a cidade se desenvolve como um *semilattice* e não como uma árvore, bem como o conceito do arquiteto Cedric Price, que entendia as antigas cidades como um ovo, a gema ao centro e a clara como a periferia, mas que muda no decorrer dos anos e principalmente na cidade moderna, onde fica confuso entender o que é periferia e o que é centro.

Neste contexto, foi trabalhado a ideia que a mobilidade acompanha e também funciona num sistema em rede, devido a cidade estar num sistema distribuído, com vários pontos de interesses. Com isso, é destacado a importância do sistema de mobilidade sobre trilhos, que acaba funcionando como uma espinha dorsal, e que através de sua malha ferroviária, acaba ordenando o desenvolvimento urbano de maneira profunda e permanente.

Além disso, foi desenvolvido a revisão da literatura sobre o planejamento de redes de metrô, com cálculos matemáticos para entender o desenvolvimento e análises dos sistemas de metrô; na sequência a análise de alguns sistemas de metrô em rede de algumas metrópoles e as características importantes para uma rede de metrô ser eficiente.

PALAVRAS-CHAVE: Mobilidade, Metrô, Ferrovia, Trilhos, Planejamento Territorial, Cidades Distribuída, Metrô em Rede.

ABSTRACT

The idea of this master's work is to present the development of metrô networks, seeking to understand how the planning and development of metrô networks works. The work begins by explaining the existence of cities, understanding the social and anthropological dynamics that interfere in the distribution of the urban fabric.

In the planning of cities and mobility, the theory of the architect Christopher Alexander that the city develops like a semi-lattice and not like a tree was highlighted, as well as the concept of the architect Cedric Price, who understood the ancient cities as an egg, the yolk at the centre and clear as the periphery, but that changes over the years and especially in the modern city, where it is confusing to understand what is preferred and what is centre.

In this context, the idea was worked on that mobility accompanies and works in a networked system, because the city is in a distributed system, with several points of interest. With this, the importance of the mobility system on rails and subways are highlighted, which ends up functioning as a backbone, and which, through its rail network, ends up ordering urban development in a profound and permanent way.

In addition, a literature review on metrô network planning was developed, with mathematical calculations to understand the development and analysis of metrô systems; Next, the analysis of some networked metrô systems in some metrôpolises and the important characteristics for an efficient metrô network.

KEYWORDS: Mobility, Metrô, Railroad, Rails, Territorial Planning, Distributed Cities, Network.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. VISÃO GERAL	1
1.2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	2
1.3. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICAÇÃO	3
1.4. OBJETIVO DA PESQUISA	3
1.5. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES E RESULTADOS ESPERADOS.....	4

2. REVISÃO DA LITERATURA 5

2.1. CONTEXTO GERAL.....	5
2.2. PLANEAMENTO URBANO	5
2.3. PLANEAMENTO DE MOBILIDADE	13
2.4. PLANEAMENTO DE METRÔ	16
2.5. ABORDAGENS SOBRE PLANEAMENTO DE METRÔ EM REDE	17
2.6. MELHOR CONECTIVIDADE E ACESSIBILIDADE NO TECIDO ESPACIAL URBANO	19

3. METODOLOGIA 20

4. RESULTADOS..... 22

4.1. VISÃO GERAL.....	22
4.2. Os METRÔS COMO UM SISTEMA EM REDE	22
4.3. REDES SEM ESCALA	27
4.4. REDES DE “MUNDOS PEQUENOS”	27
4.5. O CONCEITO DE ROBUSTEZ	28
4.6. AS REDES MUNDIAIS DE METRÔ.....	31
4.7. UM METRÔ MODELO “BRINQUEDO”	33
4.8. COMO ANALISAR O DESEMPENHO DE UMA REDE METRÔPOLITANA.....	36
4.8.1. EFICIÊNCIA TOPOLÓGICA DE SISTEMAS DE METRÔ EM REDE	37
4.8.1.1. PROPRIEDADES TOPOLÓGICAS	37
4.8.1.2. ALGORITMO DE ROTEAMENTO DO PASSAGEIRO	37

4.8.1.3. ROTEAMENTO INTUITIVO DOS PASSAGEIROS	39
4.8.2. EFICIÊNCIA TOPOLÓGICA METRÔPOLITANA	40
4.8.3. ANÁLISE DE ROBUSTEZ DO SISTEMA DE METRÔ.....	41
4.8.3.1. AVALIAÇÃO DA CENTRALIDADE DA ESTAÇÃO	41
4.8.3.2. AVALIAÇÃO DE ROBUSTEZ	42
4.8.3.3. MODELO DE ATAQUE.....	42
4.8.3.4. INDICADORES DE DESEMPENHO	42
5. ESTUDO DE CASO	43
5.1. VISÃO GERAL.....	43
5.2. AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA TOPOLÓGICA.....	43
5.3. AVALIAÇÃO DA ROBUSTEZ.....	45
6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
Referências Bibliográficas	51
Anexos.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 - Estruturas em árvore e em semilattice.....	7
Fig. 2 - Diagramas (Redesenhados por Nikos Salingaros).....	7
Fig. 3 - O plano da Grande Londres de 1943.	9
Fig. 4 - O Plano de Tóquio, proposto por Kenzo Tange.	10
Fig. 5 - O Plano de Brasília, desenhada por Lúcio Costa.	11
Fig. 6 - “Diagrama dos três ovos” de Cedric Price.	13
Fig. 7 - Fluxograma de métodos de estimativa de OD de rede completa, fontes de dados necessárias e finalidade da saída.	15
Fig. 8 - Mapa de rede de metrô de Montreal.	23
Fig. 9 - Representação da rede metropolitana de Montreal como um gráfico.	24
Fig. 10 - Relação entre o fator de escala ϵ e distribuição de frequência normalizada.	31
Fig. 11 - Distribuição de graus dos 20 maiores sistemas de metrô do mundo.....	32
Fig. 12 - Log(1—cdf) normalizado em função do grau.....	35
Fig. 13 - Probabilidade de decisão de roteamento intuitiva P_{MTP}	40
Fig. 14 - Distribuição do comprimento do caminho.....	44
Fig. 15 - Probabilidade de ocupação do nó (NOP) versus grau do nó.....	45
Fig. 16 - DRR e CA versus número de nós sob ataque aleatório (RA).	46
Fig. 17 - DRR e CA versus número de nós sob ataque de alvo (TA) de acordo com a ordem descendente de NOP.....	47
Fig. 18 - DRR e CA versus número de nós sob ataque ao alvo de acordo com a ordem de intermediação descendente.	47

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Medidas de rede coletadas para o sistema de metrô de Montreal.	26
Tabela 2 - Dados básicos da escala do sistema metrôpolitano (a partir de 2016).	43
Tabela 3 - Estatísticas e ajuste de parâmetros de distribuição.	44
Tabela 4 - Eficiência topológica metrôpolitana (MTE) de redes metrôpolitanas.	45
Tabela 5 - Número crítico N_c e fração f de nós removidos (levando a 90% dos pares OD desconectados) sob ataque aleatório (RA) e ataque ao alvo (TA).....	46
Tabela 6 - Propriedades de rede de sistemas de metrô.....	54
Tabela 7 - Resultados de regressão e indicadores estatísticos para análise sem escala.	55

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

Lista de abreviaturas

CA	Cost Adjustment (Ajuste de Custo)
CDF	Cumulative Distribution Function (Função de Distribuição Cumulativa)
DRR	Disabled Route Ratio (Razão de Rota Desabilitada)
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GSM	Global System for Mobile Communications (Sistema Global para Comunicações Móveis)
MTE	Metrô Topological Efficiency (Eficiência Topológica Metropolitana)
MTP	Minimum Transfer Path (Caminho Mínimo de Transferência)
NOP	Node Occupying Probability (Probabilidade de Ocupação do Nó)
OD	Origem-Destino
ONU	Organização das Nações Unidas
PIL	Passenger Intuitive Logic (Lógica Intuitiva do Passageiro)
RA	Random Attack (Ataque Aleatório)
RF	Random Failure (Falha Aleatória)
SP	Shortest Paths (Caminho mais curto)
TA	Target Attack (Ataque ao Alvo)

Lista de símbolos

V	Vértices
v'	vértices monotónicos
v	vértices diatónicos
v^e	Fim
v^t	Transferir
E	Arestas
e'	arestas monotónicas
e	arestas diatónicas
e^s	Solitária
e^m	Múltiplo
β	Conexões médias
δ	max. número de transferências

1.

INTRODUÇÃO

1.1. VISÃO GERAL

As Nações Unidas projetam que até 2050 a população mundial residente em áreas urbanas chegue em 68%, (Nations, 2018)¹. Esse aumento expressivo na população global com estimativas indicando que poderemos chegar a 9,7 bilhões de pessoas trará desafios significativos para a mobilidade urbana, uma vez que cada vez mais pessoas estarão vivendo em áreas urbanas.

Com o aumento da urbanização, as cidades enfrentarão uma demanda crescente por sistemas de transporte eficientes e sustentáveis. O aumento do número de veículos nas ruas, combinado com o aumento da população, pode resultar em congestionamentos, poluição do ar, tempo de viagem prolongado e menor qualidade de vida nas áreas urbanas, com isso é necessário um sistema de transporte público eficiente e de alta capacidade.

Em 2015, 157 cidades tinham sistemas de metrô no mundo em 2015, e 40% de toda a infraestrutura do metrô foi construída desde 2000. Embora a maioria dos novos sistemas esteja no mundo em desenvolvimento, muitas cidades europeias e norte-americanas planejam expandir suas redes. No entanto, falta a justificativa econômica para esses projetos de grande escala. (Pogonyi et al., 2021)

Para lidar com esses desafios, será necessário um planejamento urbano cuidadoso que promova o desenvolvimento de infraestrutura adequada, integração de modos de transporte e soluções de mobilidade sustentável. Mas entender que incentivos para o uso de veículos elétricos e compartilhados, a criação de infraestrutura para bicicletas e pedestres são algumas das medidas que devem ser uma complementaridade ao sistema, pois devemos focar numa infraestrutura de sistema em rede, sendo o sistema de trilhos como a espinha dorsal desta estrutura.

Além disso, a tecnologia desempenhará um papel crucial na transformação da mobilidade urbana. A digitalização, conectividade e a adoção de veículos autônomos podem melhorar a eficiência do sistema de transporte, otimizando rotas, reduzindo congestionamentos e aumentando a segurança. Com o avanço da tecnologia atualmente é possível realizar pesquisas de Origem-Destino, através de dados de aplicações, fornecendo um estudo exato ao invés de inquéritos, que não trabalham dados empíricos e não exatos; outro fator relevante no uso da tecnologia é entender o deslocamento pendular atual, na qual as pessoas deslocam a destinos variados.

No entanto, essas soluções exigirão investimentos significativos em infraestrutura e políticas públicas eficazes. O planejamento urbano sustentável, a colaboração entre setores público e privado, e a

¹ Disponível em: <https://www.un.org/en/desa/2018-revision-world-urbanization-prospects>

participação ativa da comunidade serão fundamentais para enfrentar os desafios de mobilidade para o futuro.

Com esses desafios para a mobilidade urbana será necessário adotar abordagens inovadoras e sustentáveis para enfrentar os problemas de congestionamento, poluição e falta de eficiência nos sistemas de transporte, garantindo assim a acessibilidade e qualidade de vida nas cidades do futuro.

Neste cenário, o sistema de metrô em rede é amplamente considerado como um dos melhores modais de transporte para enfrentar os desafios de mobilidade, pois um sistema de metrô eficiente pode desempenhar um papel crucial na promoção de uma mobilidade sustentável e de qualidade.

O sistema de metrô em rede oferece várias vantagens significativas. Em primeiro lugar, ele permite o transporte eficiente de um grande número de passageiros, reduzindo o congestionamento nas vias e minimizando os tempos de viagem. Isso contribui para a melhoria da qualidade de vida nas cidades, reduzindo o estresse relacionado ao trânsito e oferecendo uma opção de transporte rápido e confiável.

Com isso entendemos que o metrô está se tornando cada vez mais importante no desenvolvimento urbano, e há cada vez mais aspectos das influências do metrô, como estrutura espacial urbana (Xiaohui et al., 2016)

Além disso, o sistema de metrô é um modal de transporte de baixa emissão de carbono, contribuindo para a redução da poluição do ar e dos gases de efeito estufa. Ao oferecer uma alternativa ao uso de veículos particulares movidos a combustíveis fósseis, o metrô em rede ajuda a melhorar a qualidade do ar e a mitigar os impactos das mudanças climáticas.

Outra vantagem do sistema de metrô é sua capacidade de integração com outros modos de transporte, como ônibus, trens regionais e bicicletas. A existência de estações intermodais possibilita a transição suave entre diferentes modos de transporte, facilitando a mobilidade dos passageiros em toda a cidade.

No entanto, é importante ressaltar que a implementação de um sistema de metrô em rede requer um planejamento cuidadoso, investimentos significativos em infraestrutura e políticas adequadas. O financiamento adequado, a colaboração entre governos e o engajamento da comunidade são fundamentais para o sucesso do sistema de metrô em rede como o melhor modal de transporte em um contexto de aumento populacional.

1.2. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Com base em estudos da Organização das Nações Unidas (ONU), é projetado que em 2050 enfrentaremos um desafio significativo em relação à mobilidade urbana devido ao crescimento populacional nas áreas urbanas. O aumento previsto na população urbana global pode resultar em sérios problemas de mobilidade nas cidades ao redor do mundo, sendo necessário buscar um modal eficaz de alta capacidade, e neste trabalho é defendido o sistema de metrô em rede.

À medida que mais pessoas se concentram nas áreas urbanas, a demanda por transporte aumentará consideravelmente. Isso pode levar a congestionamentos de tráfego mais intensos, tempos de viagem prolongados, falta de espaço nas vias e sobrecarga dos sistemas de transporte existentes. A infraestrutura de transporte urbano, muitas vezes já sobrecarregada, pode ter dificuldade em atender às necessidades de uma população em rápido crescimento.

A falta de planejamento urbano adequado e a ausência de investimentos suficientes em infraestrutura de transporte podem agravar ainda mais esses desafios. A expansão desordenada das cidades, o déficit de transporte público eficiente e a falta de integração entre diferentes modos de transporte podem contribuir para um cenário problemático de mobilidade no futuro.

Para enfrentar esses desafios, serão necessárias abordagens inovadoras e sustentáveis, e investimentos significativos em infraestrutura de transporte de alta capacidade como sistemas de metrô em rede.

1.3. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICAÇÃO

A mobilidade urbana é um desafio crescente nas cidades em todo o mundo, sendo essencial discutir e planejar soluções eficazes para as questões atuais e futuras. Neste contexto, o sistema de metrô em rede surge como uma opção promissora para enfrentar os desafios de mobilidade, oferecendo uma série de benefícios que contribuirão para uma mobilidade mais sustentável e eficiente.

O sistema de metrô em rede se destaca por sua capacidade de transportar muitos passageiros de maneira rápida e eficiente. Esse meio de transporte desempenha um papel fundamental no enfrentamento da crescente demanda de mobilidade, contribuindo para a redução do congestionamento viário e aprimorando o fluxo de pessoas pela cidade.

Um aspecto importante é a elaboração de modais de mobilidade que promovam a sustentabilidade ambiental, considerando as questões relacionadas às mudanças climáticas e a necessidade de diminuir as emissões de carbono. Nesse sentido, o sistema de transporte metroviário em malha se destaca como uma alternativa ecologicamente sustentável, contribuindo de forma significativa para a redução da poluição do ar e das emissões de gases de efeito estufa.

Um dos principais desafios da mobilidade urbana é a confiabilidade do sistema de transporte. O sistema de metrô em rede, geralmente operando em infraestruturas subterrâneas, é menos suscetível a interrupções causadas pelo tráfego intenso ou condições climáticas adversas. Isso garante uma maior confiabilidade e previsibilidade no deslocamento dos usuários, proporcionando uma experiência de transporte mais segura e eficiente.

Pois isso, entendemos que o metrô promove o processo de desenvolvimento policêntrico da estrutura espacial urbana, pois à medida que a escala das cidades se expande, é difícil que recursos e funções altamente concentrados irradiem para toda a cidade, muitas cidades desenvolvem lentamente novos subcentros para assumir algumas das funções dos centros urbanos originais, e o metrô promove a formação de subcentros urbanos, enquanto os subcentros estão organicamente ligados à promoção da otimização contínua da estrutura espacial urbana e à formação de um traçado racional. (Jun, 2020)

1.4. OBJETIVO DA PESQUISA

A mobilidade urbana enfrenta desafios cada vez maiores nas cidades do mundo todo, exigindo soluções inovadoras e sustentáveis para garantir um transporte eficiente e acessível. Nesse contexto, o transporte sobre trilhos se destaca como uma opção de mobilidade confiável e de alto desempenho. O objetivo geral desta dissertação é defender o transporte sobre trilhos como uma solução viável e eficaz nas cidades em expansão com sistemas de metrô pouco desenvolvido ou em cidades que desejam implantar sistemas de metrô. Com foco específico no sistema de metrô em rede, como já existente em cidades renomadas como Londres e Nova Iorque.

O transporte sobre trilhos é na verdade uma complementaridade ao sistema de mobilidade e não uma alternativa aos outros modais, visto que o sistema de mobilidade funciona no sistema de integração multimodal, posto isso o objetivo é destacar que o sistema de metrô em rede, emerge como uma opção promissora para o futuro da mobilidade urbana, funcionando como a “espinha dorsal” do sistema.

Neste trabalho definimos metrô como, transporte ferroviário urbano com direito de passagem exclusivo, seja ele subterrâneo ou elevado, e como isso entender e mapear como o sistema de mobilidade sobre trilhos se desenvolve e evolui através do entendimento de como a cidade funciona e é distribuída. Além

disso, destacar as vantagens desse modal, sua capacidade de transporte, a amplitude, a sustentabilidade e confiabilidade. Com isso a dissertação contribuirá para a discussão sobre o planejamento de cidades com sistema de metrô em rede, na busca de soluções de mobilidade eficientes e acessíveis, no contexto de cidade que tendem a ter populações urbanas crescentes.

Ao final, a dissertação busca contribuir para a discussão sobre o planejamento de mobilidade sobre trilhos, trazendo conceitos e uma revisão recente da literatura, bem como norteando pesquisas de modelos de implantação e expansão de redes de metrô, além de buscar por soluções de mobilidade eficientes.

1.5. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES E RESULTADOS ESPERADOS

Esta dissertação busca contribuir para o campo da mobilidade urbana e planejamento de transporte, conscientizando os urbanistas sobre uma questão que é atual e relevante, mas pode ser um problema futuro sem precedentes. Neste sentido a pesquisa tem como foco apresentar uma argumentação sólida e embasada em estudo de caso de artigos científicos revisados, defendendo o transporte sobre trilhos como uma solução viável e eficaz para a mobilidade urbana.

Contudo, existem desafios envolvidos na implementação e expansão do sistema de metrô em rede, bem como os requisitos necessários para sua adoção. Ao examinar aspectos como investimentos financeiros, planejamento urbano adequado, envolvimento da comunidade e parcerias público-privadas, a pesquisa fornece uma compreensão abrangente dos obstáculos e das considerações práticas envolvidas na implementação desse sistema.

Com o rápido crescimento das populações urbanas, a pesquisa contribui para o campo do planejamento de cidades inteligentes, oferecendo uma perspectiva sobre soluções de mobilidade eficientes e sustentáveis. A defesa do transporte sobre trilhos, com foco no sistema de metrô em rede, ajuda a direcionar os esforços de planejamento urbano para a adoção de soluções que promovam a qualidade de vida, a acessibilidade e a sustentabilidade nas cidades.

Portanto, esta dissertação busca oferecer contribuições importantes para o campo da mobilidade urbana, fornecendo uma defesa embasada e fundamentada do transporte sobre trilhos, com ênfase no sistema de metrô em rede. Ao analisar o estudo de caso, considerar desafios e requisitos, e contribuir para o planejamento de cidades inteligentes, a pesquisa fornece conhecimentos valiosos e perspectivas práticas para enfrentar os desafios da mobilidade urbana no futuro.

2.

REVISÃO DA LITERATURA

2.1. CONTEXTO GERAL

É preciso ter uma visão integrada do sistema de mobilidade para a nova realidade das cidades e promover o planejamento de longo prazo, pensar numa política de Estado e não de Governo, porque a mobilidade é algo que irá transcender gerações.

A Urbanização exige que nos planeadores pensamos na mobilidade urbana como um sistema em rede e não algo segregado, pensar no uso de solo para evitar que pendularidade diminua a eficiência.

Priorizar a mobilidade estruturante e a sua integração, e este estudo idealizamos os trilhos, porém o trilho sozinho não irá resolver o problema da mobilidade atual e futura, sendo certo a necessidade da sua integração com os demais modais existentes.

Porém, um local ou corredor de grande demanda de mobilidade, somente um transporte de grande capacidade pode atender e gerir a mobilidade exigida e neste ponto colocamos o modal estruturante como o sistema de trilhos, no caso o metrô. Com modal estruturante, fazemos a integração com demais modais existentes e planeamos a demanda atual e futura para determinada localidade.

Em relação a sobreposição de modais, pode oferecer maior comodidade aos usuários, permitindo-lhes escolher a melhor opção para cada trecho de sua viagem. Isso pode incluir o uso de diferentes modos de transporte, como metrô, ônibus, bicicleta, ou serviços de compartilhamento de carros. Neste entendimento, combinar diferentes modais pode levar a viagens mais rápidas e eficientes, especialmente em áreas com congestionamentos de tráfego. Por exemplo, utilizar uma bicicleta ou patinete elétrico pode ser mais rápido para percorrer distâncias curtas em áreas urbanas.

Mas a sobreposição de modais só poderá ser benéfica para a mobilidade urbana se for gerenciada de forma eficiente, com uma infraestrutura bem planejada, integração adequada entre os modais e políticas que incentivem a utilização de transporte sustentável.

2.2. PLANEJAMENTO URBANO

Planeamento Urbano é o processo de gestão do desenvolvimento físico, econômico, social e ambiental das cidades, com o objetivo de melhorar a qualidade de vida dos seus habitantes, garantir o acesso a serviços e oportunidades, promover a eficiência e a sustentabilidade dos sistemas urbanos, e preservar o patrimônio histórico e cultural.

Para Almeida (2018), o planejamento urbano é um conjunto de ações e de construção do desenvolvimento urbanístico, que constitui uma ferramenta alternativa para minimizar os efeitos da

interferência do homem no meio ambiente, sendo indispensável para as implantações de ações delineadoras para os municípios o qual desencadearia melhor controle sobre o uso e ocupação do solo.

No mesmo sentido, podemos definir Planeamento Urbano como a arte e ciência de ordenar o uso do solo e do espaço urbano, com base em uma visão estratégica do futuro da cidade, para alcançar objetivos específicos de desenvolvimento socioeconômico, ambiental e cultural. Um processo para estabelecer objetivos e metas para o desenvolvimento da cidade, avaliando as condições atuais e futuras, identificando desafios e oportunidades, definindo estratégias e políticas, e coordenando a implementação de ações para alcançar os objetivos estabelecidos. (Almeida, 2018)

Uma questão importante é definir o que é a cidade, e ir além das estruturas construídas, uma vez que o tecido urbano é um decalque do tecido social, com os bairros nobres e periféricos bem destacados. Entendendo como as questões antropológicas e sociais interferem na distribuição do tecido urbano. Historicamente, o desenvolvimento urbano foi guiado por modelos centralizados e hierárquicos, mas nas últimas décadas, surgiu uma abordagem mais colaborativa e participativa do urbanismo.

De acordo com a pesquisa de Carmona et al. (2008), "o urbanismo colaborativo envolve a participação ativa de todos os grupos interessados na concepção, produção e gestão do espaço urbano, como uma forma de promover a inovação social e melhorar a qualidade de vida urbana" (p. 189). Isso se alinha com a definição de Bovaird et al (Bovaird & Loeffler, 2012), que destacam a importância da colaboração entre os setores público, privado e da sociedade civil para enfrentar os desafios urbanos complexos, como a sustentabilidade, a inclusão social e o planejamento participativo. (Carmona et al., 2021)

Além disso, a pesquisa de Korthals Altes et al. (2002) destaca a necessidade de uma governança urbana mais colaborativa para melhorar a eficácia das políticas urbanas e aumentar a confiança dos cidadãos nas autoridades locais. (Korthals Altes, 2002)

Entendendo a questão do Planeamento Urbano e a importância do Urbanismo colaborativo, partimos para a definição da cidade como um sistema distribuído, conforme entendimento de Alexander, C. (1965) todos os modelos da cidade, desde os antigos até os modernos, se baseiam na árvore. Mas, nesta era de mudança constante, nunca foi tão claro que a cidade não é uma árvore. (Alexander, 1965)

As cidades que surgiram ao longo de vários anos de forma mais espontânea podemos chamar como cidades naturais. Já as outras cidades, ou partes delas, que foram intencionalmente criadas por designers e planejadores, são conhecidas como cidades artificiais. Exemplos de cidades naturais incluem Siena, Liverpool, Kyoto e Manhattan, enquanto Levitown, Chandigarh, Brasília e as novas cidades britânicas são exemplos de cidades artificiais.

A cidade é um complexo, semelhante a um semilattice² ao invés de uma hierarquia. É formada por múltiplos inter-relacionamentos cruzados, não por um conjunto hierárquico de relações. É quase impossível entender isso com a linguagem e os conceitos atuais. Com isso, definimos a cidade como um sistema distribuído que funciona como uma rede interligada, conforme a figura abaixo:

² Em matemática é um conjunto parcialmente ordenado que tem uma junção para qualquer subconjunto finito não vazio. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/semilattice>

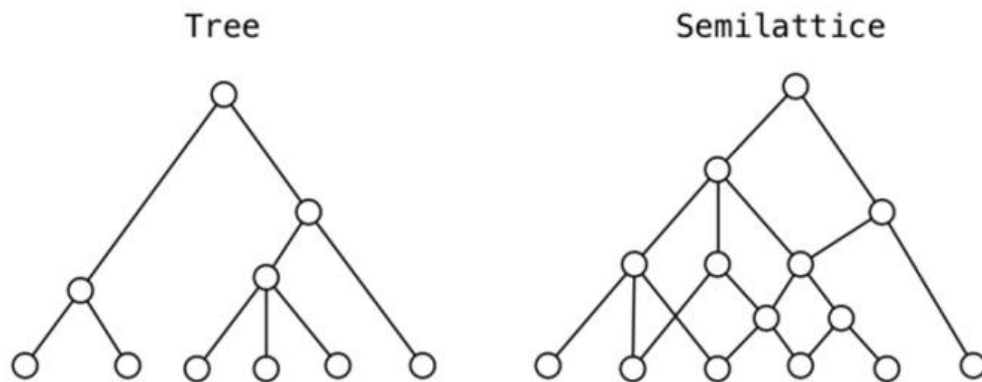


Fig. 1 - Estruturas em árvore e em semilattice.
Fonte: (Quintella, 2015)

Neste sentido, podemos entender que uma cidade natural possui uma organização de semilattice; mas quando organizamos uma cidade artificialmente, organizamo-la como um esquema de árvore.

As unidades das quais uma cidade artificial é feita são sempre organizadas na forma de árvore. (...) Vamos definir a árvore mais uma vez: Sempre que tivermos uma estrutura em árvore, isso significa que dentro dessa estrutura nenhuma peça de nenhuma unidade está de alguma forma conectada às outras unidades, exceto por meio daquela unidade global. (Alexander, 1965)

Conforme Quintella (2015), o sistema em semilattice, ele se vale de conexões mais complexas, que admite sobreposições. Este é, ele afirma, o tipo de estrutura das cidades tradicionais e uma marca necessária de vitalidade da cidade: “É a falta dessa complexidade estrutural, característica das árvores, que está arruinando nossos conceitos de cidade”. (Alexander, 1965; Quintella, 2015)

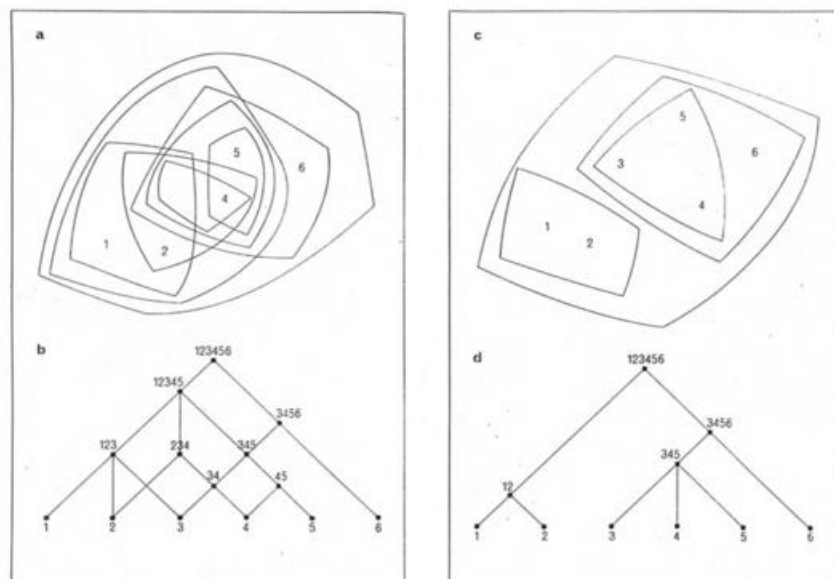


Fig. 2 - Diagramas (Redesenhados por Nikos Salingaros).
Fonte: (ALEXANDER, 1965).

Neste sentido entendemos que os diagramas a e b é o modelo ideal, pois o modelo de cidade como um sistema distribuído, em contraposição à abordagem tradicional que a concebe como uma árvore hierárquica, oferece uma visão mais dinâmica e adaptável para o planejamento urbano. Ao reconhecer a cidade como um ecossistema complexo e interconectado, onde diferentes elementos e comunidades se entrelaçam, o urbanismo colaborativo ganha destaque como uma estratégia que valoriza a participação ativa dos cidadãos no processo de desenvolvimento urbano.

Ao observarmos essas duas representações, percebemos que a seleção de subconjuntos mantém os subconjuntos como uma estrutura maior. É essa estrutura que nos interessa aqui. Quando essa estrutura atende a certas condições, ela é denominada semilattice. Já quando ela atende a outras condições restritivas, é chamada de árvore. (Alexander, 1965)

A estrutura representada nos diagramas a e b é um semilattice. Ele obedece ao axioma desde que tanto [234] quanto [345] pertençam à coleção, e suas partes comuns [34] também façam parte dela. Esse axioma estabelece que sempre que duas unidades se sobrepõem, a área de sobreposição é reconhecida como uma entidade distinta e, portanto, também uma unidade. Tomando como exemplo uma farmácia, uma unidade seria composta por estantes, calçada e semáforos, enquanto outra unidade seria a própria farmácia, com sua entrada e estante de jornais. Essas duas unidades se sobrepõem na estante dos jornais. É evidente que essa área de sobreposição é reconhecida como uma unidade distinta e, portanto, atende ao axioma mencionado acima, que descreve as características de um semilattice. (Alexander, 1965)

A estrutura representada nos diagramas c e d é uma árvore (Figura 02). Ao excluir a possibilidade de sobreposição nos conjuntos, esse axioma garante que o axioma do semilattice não possa ser violado, pois cada esquema de árvore é trivialmente um semilattice simples. (Alexander, 1965)

Portanto, O axioma da árvore afirma: “umas coleções de conjuntos formam uma árvore se, e somente se, para cada dois conjuntos que pertencem à coleção cada um está totalmente contido no outro, ou eles estão totalmente desconectados”.

Neste sentido, não é apenas a sobreposição que torna a distinção entre os dois importantes. Ainda mais significativo é o fato de que os semilattices são estruturas abruptas e potencialmente muito mais complexas do que as árvores. Podemos observar a maior complexidade dos semilattices em relação às árvores através do seguinte fato: uma árvore baseada em 20 elementos pode conter no máximo 19 subconjuntos de 20, enquanto um semilattice baseado nos mesmos 20 elementos pode conter mais de 1.000.000 de subconjuntos diferentes. (Alexander, 1965)

Essa ampla gama de variação é um indicador da grande complexidade que um semilattice pode apresentar em comparação com estruturas simples, como a das árvores. É a ausência dessa complexidade estrutural, típica das árvores, que está comprometendo nossos conceitos de cidade.

No plano da Grande Londres de 1943, concebido por Abercrombie e Forshaw, ilustrado na Figura 03 abaixo, apresenta a estrutura planejada para a cidade. Nesse plano, a cidade é composta por várias comunidades distintas, cada uma claramente separada das comunidades adjacentes. Abercrombie enfatizou o objetivo de realçar a identidade das comunidades existentes, aumentando seu nível de segregação e, quando necessário, reorganizando-as como entidades separadas e definidas. Além disso, ele descreveu que as próprias comunidades são compostas por várias subunidades, frequentemente com suas próprias lojas e escolas, correspondendo às unidades de vizinhança. O esquema proposto para a cidade é uma estrutura em forma de árvore, com dois níveis principais: as comunidades, que são as maiores unidades da estrutura, e as vizinhanças, que são as menores subunidades. Nesse esquema, não há sobreposição de unidades, tornando a estrutura semelhante a uma árvore. (Alexander, 1965)

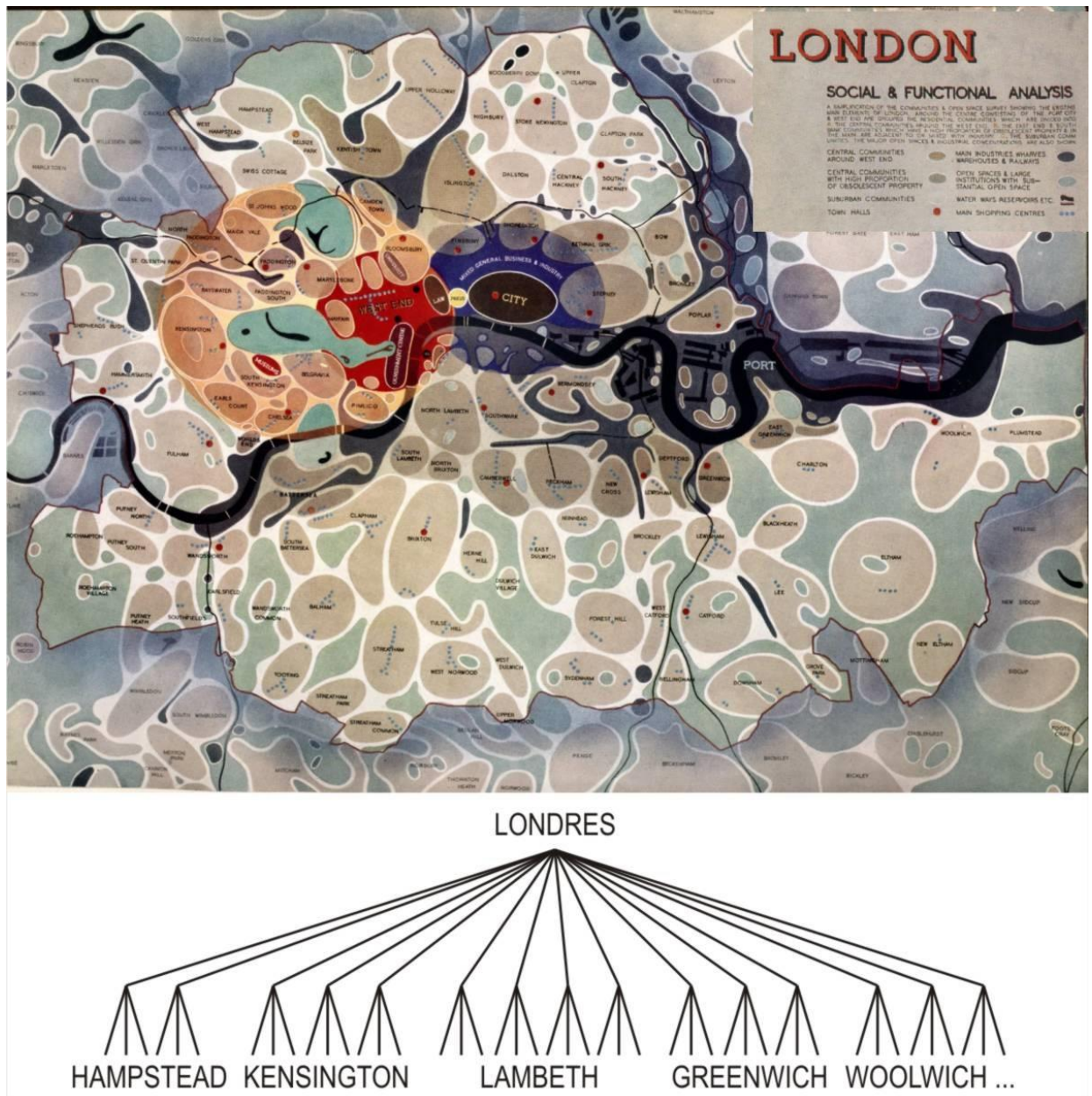


Fig. 3 - O plano da Grande Londres de 1943.

Fonte: (ALEXANDER, 1965)

No Plano de Tóquio, idealizado por Kenzo Tange, conforme apresentado na Figura 04 abaixo, é um exemplo notável de planejamento urbano. Esse plano é composto por uma série de loops³ alongados sobre a baía de Tóquio. Existem quatro loops principais, cada um deles contendo três loops intermediários. No segundo maior loop, um dos loops intermediários abriga uma estação de trem, enquanto o outro é destinado ao porto. Nos demais loops intermediários, encontram-se três loops menores que são designados como áreas residenciais, com exceção do terceiro maior loop, onde um dos loops abriga escritórios do governo e o outro é destinado a escritórios de empresas. A disposição desses loops cria uma estrutura única e harmoniosa no plano urbano de Tóquio, demonstrando uma abordagem inovadora na organização espacial da cidade. (Alexander, 1965)

³ Loop: É uma aresta que conecta um vértice a ele mesmo.

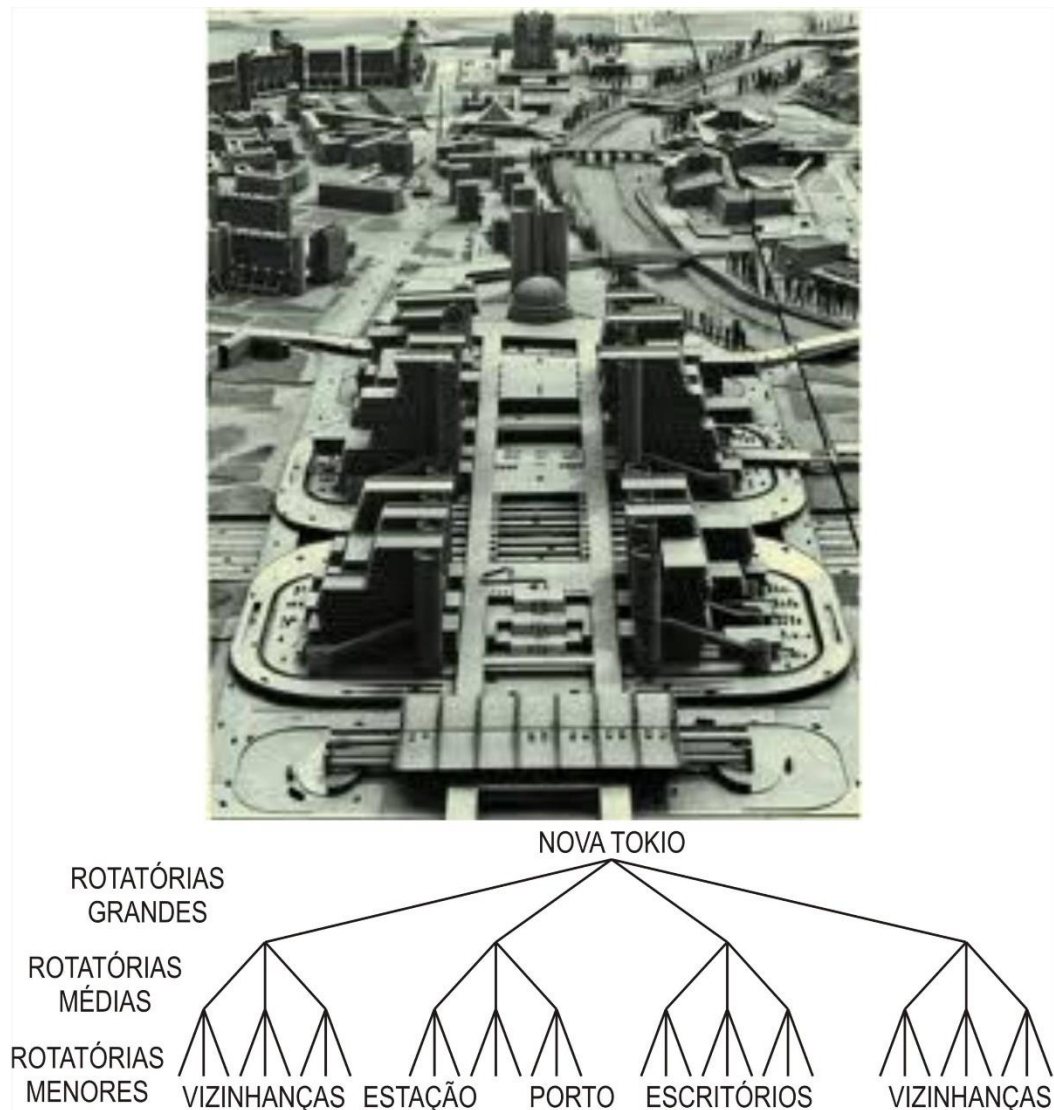


Fig. 4 - O Plano de Tóquio, proposto por Kenzo Tange.

Fonte: (ALEXANDER, 1965)

No plano piloto de Brasília 1957, desenhada por Lúcio Costa, conforme figura 5 abaixo, toda a forma da cidade se ampara em um eixo central e cada uma das metades é servida uma via principal. Ela é, subsidiariamente, acompanhada por artérias paralelas. Finalmente, todas são alimentadas por ruas rodeadas que delimitam as grandes quadras. A estrutura é claramente em árvore. (Alexander, 1965)

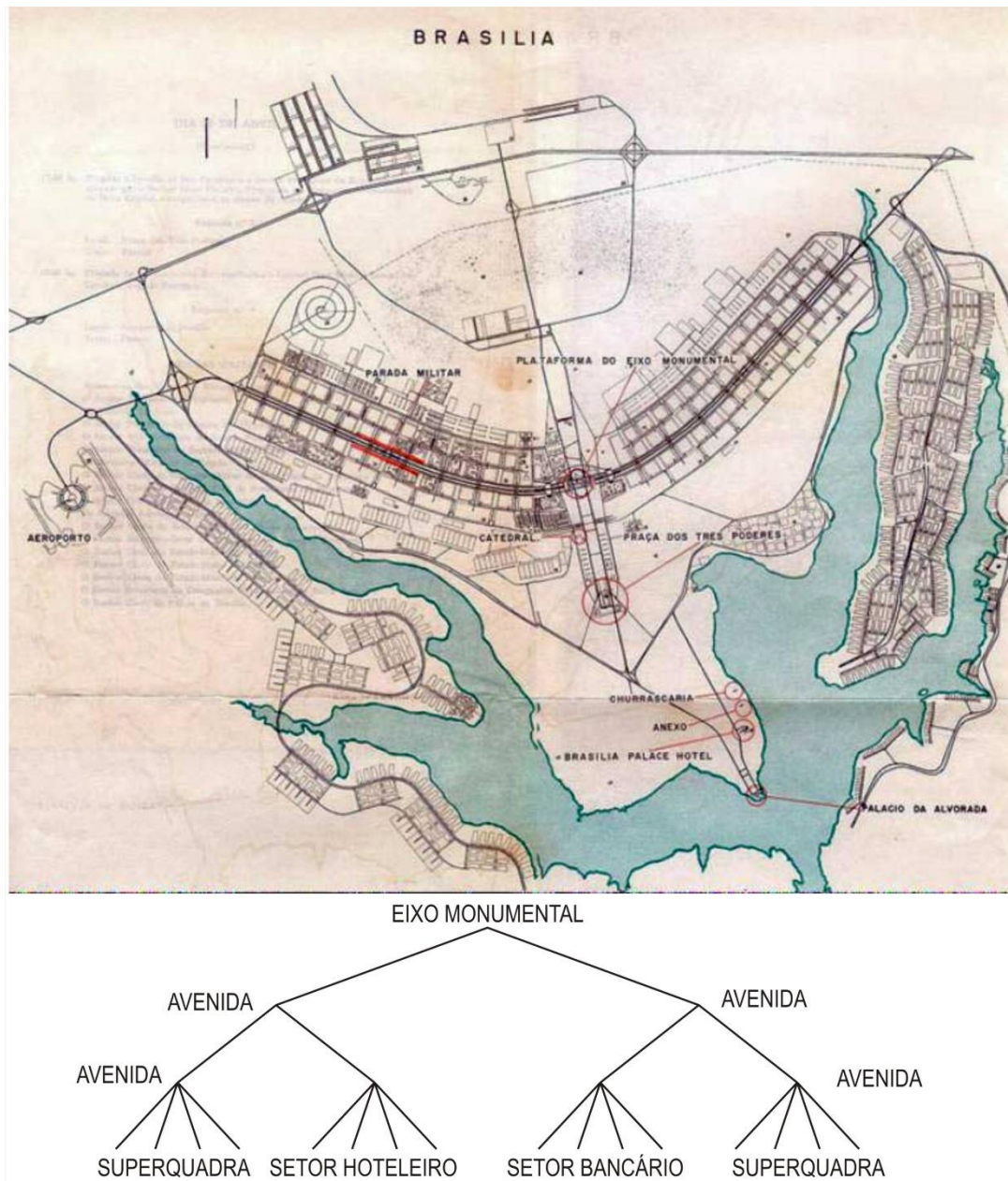


Fig. 5 - O Plano de Brasília, desenhada por Lúcio Costa.

Fonte: (ALEXANDER, 1965)

As cidades artificiais são sempre organizadas na forma de uma estrutura em árvore, o que nos permite compreender melhor o seu significado e implicações. Vamos redefinir a estrutura de árvore. Dentro de uma estrutura em árvore, nenhuma unidade está conectada a outras unidades, exceto por meio da unidade global, que é difícil de ser compreendida. (Alexander, 1965)

Conforme Alexander (1965), todas as cidades artificiais descritas possuem estruturas em árvore, ao contrário das estruturas semilattices da pintura de Nicholson. É ainda a pintura e outras imagens como ela que devem ser nossos veículos de pensamento. E quando desejamos ser mais precisos, o semilattice, sendo parte de um ramo maior da matemática moderna, é um modo poderoso de exploração das estruturas dessas imagens. É pelo semilattice que devemos procurar, não pela árvore.

Neste sentido, o planejamento urbano e a mobilidade estão interligadas, e é fundamental que sejam abordados de forma integrada também. Com o objetivo de criar cidades mais sustentáveis, inclusivas e com qualidade de vida para todos. Isso requer a adoção de políticas de mobilidade que priorizem o transporte público de forma integrada e com outros modais como a bicicleta e o pedestre, funcionando num sistema de rede, sem sobrepor ou competir com outros modais, trabalhando numa abordagem mais ampla de planejamento urbano que leve em conta a conectividade, a acessibilidade e a resiliência urbana.

Com isso temos o conceito de cidade distribuída, na qual o arquiteto Caio Vassão se baseia na ideia de descentralização e de distribuição das atividades urbanas em vez de sua concentração em um centro urbano. Em vez de pensar na cidade como um lugar onde as pessoas precisam se deslocar para realizar atividades, a cidade distribuída busca integrar diferentes funções e serviços em uma rede de pequenas comunidades que se comunicam entre si.

Segundo Vassão (2008), a cidade distribuída se baseia em três princípios fundamentais: a descentralização, a conectividade e a sustentabilidade. A descentralização refere-se à ideia de que a cidade não deve ser pensada em torno de um centro, mas sim como uma rede de comunidades menores, cada uma com sua própria identidade e função. A conectividade, por sua vez, se refere à importância da criação de conexões físicas e virtuais entre essas comunidades, permitindo a troca de informações e serviços. Finalmente, a sustentabilidade é uma preocupação fundamental da cidade distribuída, que busca integrar atividades econômicas e ambientais em uma estrutura urbana mais equilibrada e harmoniosa. (Vassão, 2008)

Para Vassão (2008), a cidade distribuída é uma alternativa ao modelo de cidade concentrada e verticalizada, que se tornou predominante no século XX. Ele argumenta que a cidade distribuída pode contribuir para a criação de espaços urbanos mais inclusivos, conectados e sustentáveis, ao mesmo tempo em que permite uma maior diversidade cultural e uma maior autonomia das comunidades locais. (Vassão, 2008)

No mesmo entendimento, o estudo de Wei et al (2020) trouxe que a rápida urbanização global testemunhou uma evolução da estrutura espacial urbana de monocêntrica para policêntrica, que está se tornando um padrão emergente de desenvolvimento urbano. (Wei et al., 2020). Pois o aumento da policentricidade urbana nada mais é que o resultado do aumento da conectividade de subcentros internos, conforme já afirmava Alexander (1965), e confirmado por Vasanen (2012), que usou dados de deslocamento e população para medir a policentricidade urbana por meio de análise de cluster espacial na Finlândia. (Vasanen, 2012)

Neste sentido, o famoso arquiteto Cedric Price trouxe o conceito da cidade como uma gema de ovo, um objeto que tem uma superfície protetora e uma parte interna. A superfície é a cidade construída, as ruas, edifícios e espaços públicos. A parte interna é a cidade não construída, a cidade da imaginação, a cidade das ideias, a cidade das possibilidades. Precisamos reconhecer a importância desta cidade não construída e pensar sobre como podemos transformá-la em realidade (Price & Littlewood, 1967)

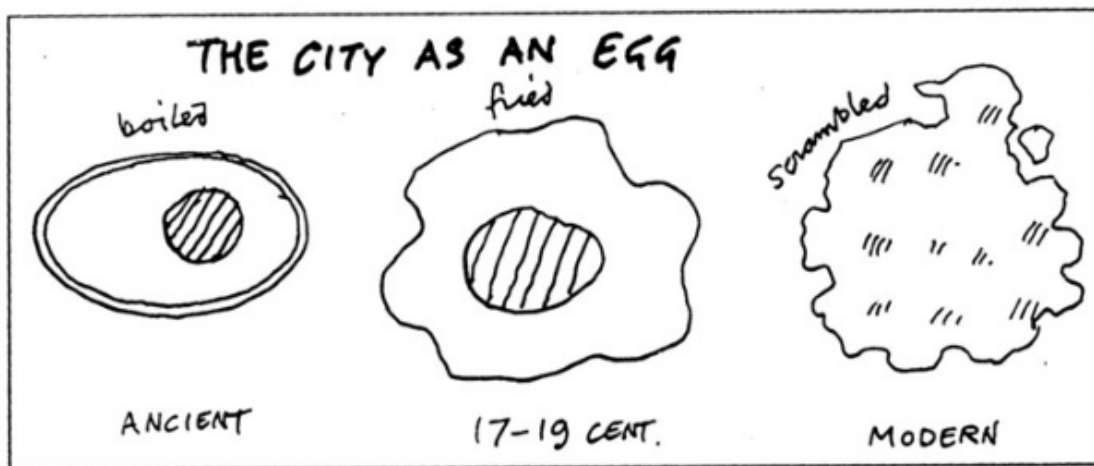


Fig. 6 - "Diagrama dos três ovos" de Cedric Price.

Fonte: Research Gate⁴

Na primeira ilustração, o ovo cozido, é a imagem de uma cidade com muralha; na segunda, no ovo estrelado, define-se um modelo dualista de urbanização, na qual a gema é o centro da cidade e a clara é a periférica ou o subúrbio frente a expansão urbana contígua ao centro, de função predominantemente habitacional e sucessivamente mais distante. Claro que a palavra "cidade" ficava confinada ao centro. Por fim, a terceira ilustração é a cidade moderna, sendo um ovo mexido, na qual não podemos definir o que é um centro ou periferia, pois os elementos estruturais de uma cidade não estão mais concentrados no centro, mas sim espalhados pelo tecido urbano conforme a sua necessidade.

Contudo, para os tempos modernos e complexos, Price entendeu a cidade como um ovo mexido, uma mistura caótica de elementos aparentemente desconexos. Na qual precisamos encontrar maneiras de criar ordem nesse caos e fazer com que a cidade funcione de forma eficiente e eficaz, (Price, 1970); e que precisamos de abordagens inovadoras e flexíveis para lidar com essa complexidade e criar cidades melhores para as pessoas" (Price, 1972)

Por fim, a questão do zoneamento de uso do solo é outro instrumento importante para o planejamento urbano. O zoneamento de uso do solo pode ser utilizado para promover a densificação urbana e o desenvolvimento em áreas próximas a pontos de transporte público, reduzindo a dependência do carro particular.

2.3. PLANEAMENTO DE MOBILIDADE

O Planejamento de Mobilidade é fundamental para o desenvolvimento de cidades sustentáveis e eficientes, especialmente em um mundo em constante transformação, compreendendo a mobilidade como a capacidade das pessoas se deslocarem de forma segura, rápida e acessível, o planejamento nessa área busca integrar diversos modos de transporte, como transporte público, ciclovias, calçadas e sistemas de compartilhamento, de maneira harmoniosa e funcional. O objetivo é oferecer alternativas de deslocamento que reduzam a dependência do uso de veículos particulares, mitigando os congestionamentos, a poluição e os impactos ambientais. Além disso, um planejamento de mobilidade eficiente promove a inclusão social ao garantir que todas as parcelas da população tenham acesso igualitário aos serviços e oportunidades urbanas.

⁴ Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Three-eggs-diagram-by-Cedric-Price_fig2_286489096

Sobre este tema Vanessa Fernandes (2018), diz que atualmente, o padrão de mobilidade é uma das primeiras formas de avaliação da cidade, das suas condições e capacidade de gerar dinâmicas inovadoras de acessibilidade e regeneração do tecido urbano. Ao refletirmos sobre as formas de mobilidade na cidade é necessário entender os diferentes modos de transportes presentes e as suas relações. (Vanessa Cristina Fernandes, 2018)

Uma questão importante para destacar são as políticas públicas eficazes para o planejamento da mobilidade urbana, pois é fundamental que as políticas sejam baseadas em evidências e incluam metas claras e mensuráveis, além de garantir que estas políticas sejam implementadas de maneira justa e equitativa para todos os cidadãos.

Segundo Cervero e Kockelman (1997), o modelo tradicional de planejamento da mobilidade urbana, conhecido como paradigma da “previsão-otimização”, se baseava em projeções de demanda de tráfego e na construção de infraestrutura para acomodar esse crescimento. No entanto, esse modelo mostrou-se insuficiente para lidar com os desafios de congestionamento, poluição e segurança viária, além de negligenciar os impactos sociais e ambientais. (Cervero & Kockelman, 1997)

O paradigma da “gestão integrada da mobilidade” é uma alternativa ao modelo tradicional, buscando promover a mobilidade sustentável e a melhoria da qualidade de vida nas cidades. Nesse sentido, a mobilidade é vista como um sistema integrado, em que se buscam soluções multimodais e uma gestão coordenada entre diferentes modos de transporte. (Banister & Stead, 2004)

A integração multimodal é uma abordagem que visa combinar diferentes modos de transporte, como o transporte público, caminhadas e ciclismo, em uma rede coesa. Neste sentido, a integração multimodal é fundamental para aumentar a eficiência do transporte e reduzir o uso do carro particular, contribuindo para uma mobilidade mais sustentável.

Além disso, o paradigma da “cidade caminhável” vem ganhando destaque, reconhecendo a importância da caminhabilidade na mobilidade urbana e na promoção de uma cidade mais saudável e inclusiva. A cidade caminhável é aquela que prioriza o pedestre em detrimento do veículo motorizado, proporcionando espaços públicos de qualidade, calçadas amplas e seguras, além de uma rede de transporte público eficiente.

Um dos paradigmas mais comuns é o modelo de planejamento baseado em demanda, que se concentra em prever e gerenciar o fluxo de tráfego existente. No entanto, esse modelo pode levar a soluções caras e insuficientes, que não abordam as causas subjacentes dos problemas de mobilidade urbana. Como alternativa, o planejamento baseado em acessibilidade tem sido proposto como um paradigma mais eficaz, que enfatiza o acesso a serviços, empregos e outras atividades, em vez de simplesmente gerenciar o tráfego.

A gestão da demanda é uma abordagem que visa incentivar a mudança de comportamento dos usuários de transporte, por meio de medidas como a cobrança de tarifas diferenciadas, a restrição ao uso do carro particular em determinadas áreas ou horários, entre outras. É fato destacar que a gestão da demanda pode ser uma ferramenta eficaz para reduzir o congestionamento de tráfego e melhorar a qualidade do ar nas cidades.

Os modelos de Origem-Destino (OD) são essenciais para o planejamento de mobilidade, pois fornecem estimativas de viagem espaço temporais que permitem aos planejadores entenderem quais modos as pessoas usam, quanto tempo viajam e para onde vão. Isso leva a uma gestão e alocação de recursos eficazes e, em última análise, a sistemas de trânsito mais eficientes. (Mohammed & Oke, 2023)

No estudo de Mohammed (2023), como os dispositivos celulares se tornaram um aspecto muito importante na vida da maioria das pessoas, grandes quantidades de dados são coletadas pelas empresas

métodos fornecem uma análise de uso da rede altamente resolvida no espaço-tempo do que é possível com os métodos de coleta de dados. (Mohammed & Oke, 2023)

Portanto, isso oferece uma imagem completa e confiável da atividade dos passageiros e das escolhas de rota que não dependem de suposições. Também pode fornecer aos planejadores, informações específicas sobre onde direcionar seus recursos disponíveis e fazer ajustes para alcançar a máxima eficiência da rede de trânsito. (Mohammed & Oke, 2023)

Neste sentido, uma abordagem geral para a estimativa de Origem-Destino em nível de rede envolve as seguintes etapas (Cui, 2006)

- Obtenha uma amostra de contagem de passageiros (de sistemas de contador automático de passageiros, cobrança automática de tarifas, etc.), uma matriz de sementes (de cobrança automática de tarifas, dados de rede móvel, etc.) e fluxos de transferência.
- Usando os totais de embarque e desembarque para cada rota e a matriz de sementes, estime as matrizes Origem-Destino no nível da rota com métodos como o ajuste proporcional iterativo.
- Inferir probabilidades de transferência de rota a partir de dados cobrança automática de tarifas e usá-los para estimar a matriz Origem-Destino em nível de rede.

Posto isto, as capacidades de planejamento oferecidas pelos modelos Origem-Destino podem ter impactos significativos nas economias em desenvolvimento ou emergentes, onde o uso do transporte público está em declínio e a propriedade de automóveis está aumentando. Esforços futuros de pesquisa em nações emergentes podem aproveitar o Big Data disponível em telemóveis para estimar modelos Origem-Destino para melhorar o planejamento. Como resultado, o potencial para aumentar o número de passageiros no trânsito pode gerar benefícios significativos para o meio ambiente. (Mohammed & Oke, 2023)

2.4. PLANEJAMENTO DE METRÔS

Os metrô foram criados para atender à crescente necessidade de transportar um grande número de pessoas em alta velocidade em cidades congestionadas. Reconhecido como uma solução eficaz para o transporte urbano, muitas cidades adotaram o metrô como uma infraestrutura urbana estratégica. (Lin et al., 2021)

O planejamento de transporte urbano sobre trilhos tem sido amplamente discutido como uma solução para os desafios de mobilidade urbana, principalmente em grandes cidades. Os sistemas de transporte sobre trilhos oferecem vantagens como maior capacidade de transporte, menor impacto ambiental e menor tempo de viagem. Neste texto, serão apresentadas algumas citações científicas sobre o planejamento de transporte urbano sobre trilhos.

A construção do metrô pode melhorar a conectividade espacial urbana, o que pode otimizar o layout funcional e a estrutura espacial das cidades, e a conectividade espacial aprimorada pode aumentar o nível de integração espacial urbana para aproximar os distritos. (Cao et al., 2016)

Neste trabalho, estendemos o termo “sistema de metrô” ao sistema de transporte ferroviário urbano com direito de passagem exclusivo, sejam eles subterrâneos, terrestres ou elevados. (Derrible & Kennedy, 2010)

Os países europeus estão investindo cada vez mais no metrô leve como um modo de transporte público de alta classe em grandes e médias cidades. Em 2015, as estatísticas da Union Internationale des

Transports Publics (UITP)⁵ mostram que os sistemas de VLT operavam em mais de 200 cidades na Europa e, globalmente, havia mais de 15.600 quilômetros de infraestrutura ferroviária, com outros 850 quilômetros em construção e 2.300 no fase de planejamento, e neste entendimento o metrô leve tem o potencial de servir como artéria central de uma cidade e criar uma ligação entre outros modos de transporte, conectividade orbital entre subúrbios e acesso radial da periferia para o centro da cidade; no entanto, seu sucesso depende muito de sua integração em uma estratégia global de desenvolvimento urbano.

Neste entendimento sobre as questões climáticas a European Commission (2011)⁶, trouxe que o metrô é um investimento de longo prazo na mobilidade urbana e no desenvolvimento sustentável das cidades, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação das mudanças climáticas.

Ademais, a rede de transporte metropolitano melhora a acessibilidade geral da estrutura espacial urbana e acelera o movimento frequente de elementos urbanos (Peng et al., 2021). Pois a construção do metrô melhora gradativamente a acessibilidade do local, o que estimula o desenvolvimento do solo ao redor e influencia a mudança da estrutura espacial urbana ao orientar o desenvolvimento do solo. (Song et al., 2023)

2.5. ABORDAGENS SOBRE PLANEAMENTO DE METRÔ EM REDE

Conforme Wu (2018), a pesquisa interdisciplinar de sistemas metroviários, sob a abordagem de redes, ainda é um campo relativamente pouco explorado. O trabalho mais antigo relatado por Latora e Marchiori, em 2002, mostrou que a rede de metrô de Boston exibiu uma propriedade de mundo pequeno e introduziu o conceito de eficiência de rede para fornecer informações úteis sobre as características gerais das redes de transporte reais. Embora haja uma vasta literatura sobre engenharia de transporte e planejamento urbano, o estudo específico sobre planeamento dos sistemas de metrô como redes, entendendo a cidade como “*cidade distribuída*” ainda é um tema com potencial para ser explorado. Essa oportunidade de desenvolvimento de conhecimento representa um caminho empolgante para a investigação e compreensão aprofundada dos sistemas de transporte público em ambientes urbanos. Neste capítulo, apresentaremos os resultados de uma pesquisa que aborda essa temática emergente, explorando as implicações e os desafios do estudo interdisciplinar de sistemas metroviários como redes complexas.

No estudo de Pogonyi et al (2021), na qual temos o artigo “Metrôs, agglomeration and displacement. Evidence from London”, eles afirmam que o século 21 pode ser o século dos metrôs, pois 55% da população mundial reside em áreas urbanas em 2018, e as Nações Unidas projetam que esse número chegue a 68% até 2050. (Pogonyi et al., 2021)

Modelos teóricos explicam como os investimentos em transporte impactam a distribuição espacial da atividade econômica. Eles argumentam que as áreas “tratadas” próximas a um novo investimento em transporte são melhores; no entanto, outras áreas “não tratadas” que ainda estão próximas do investimento, mas não sujeitas a ele, estão em pior situação. (Pogonyi et al., 2021)

Neste sentido, as áreas não tratadas ficam em pior situação devido ao deslocamento: a atividade econômica existente se desloca para a área tratada e novas empresas são impedidas de entrar. Devido a

⁵ Disponível em: <https://www.uitp.org/topics/light-rail/>

⁶ European Commission. (2011). White paper. Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource-efficient transport system. Brussels.

esse mecanismo, a maioria dos trabalhos empíricos supervaloriza o impacto do transporte ao considerar o deslocamento como crescimento. (Pogonyi et al., 2021)

Uma questão importante é que embora a maioria dos novos sistemas esteja em desenvolvimento e que muitas cidades europeias e norte-americanas planejam expandir suas redes, contudo falta a justificativa econômica para esses projetos de grande escala. Como também não há avaliação causal ex-post do impacto de uma linha de metrô na localização da empresa, já que a maioria das pesquisas avaliou rodovias. (Pogonyi et al., 2021)

Todavia, evidências interessadas no impacto do transporte na produção econômica também vêm crescendo. A análise do impacto dos projetos de transporte na atividade econômica local vem ganhando interesse, pois muitas autoridades públicas ao redor do mundo criaram metodologias para calcular essas análises de custo-benefício que incluem benefícios econômicos mais amplos. (Pogonyi et al., 2021)

Segundo Pogonyi et al (2021), existe um interesse crescente na distribuição espacial do impacto também. No artigo eles citam o estudo de Ahlfeldt e Feddersen (2017) que analisaram o impacto de um trecho do trem de alta velocidade alemão, que conecta Colônia a Frankfurt, e encontram um efeito de 8,5% em média no PIB de três municípios com paradas intermediárias usando a lógica do tratamento incidental para produzir estimativas causais. Eles também descobriram que o *efeito de transbordamento*⁷, no PIB destes municípios, diminui em 50% a cada 30 minutos de tempo de viagem e diminui para 1% após 200 minutos. (Pogonyi et al., 2021) (Ahlfeldt, 2017)

Outro dado importante é a valorização ao entorno das linhas ferroviárias, conforme Gibbons e Machin (2005), num estudo eles usaram a Jubilee Line Extension (JLE)⁸ para analisar o impacto de um esquema intramunicipal na economia. Sua metodologia de “diferenças em diferenças” mostrou que os preços dos imóveis residenciais próximos às novas estações Jubilee Line Extension aumentaram; além disso, eles descobriram que usar apenas a variação de “seção transversal” da *linha férrea*, teria mostrado efeitos três vezes maiores, pois locais mais valiosos têm maior probabilidade de receber estações. (Pogonyi et al., 2021) (Gibbons & Machin, 2005)

No estudo de Yu et al (2023), as linhas de metrô surgiram e se desenvolveram nas cidades impulsionadas por diversos fatores, e resultaram em diferentes estruturas como vemos hoje. No artigo eles buscam a resposta para a pergunta de “como as linhas de metrô crescem como um sistema” Os padrões de crescimento espaço-temporal das redes metrópolitanas e suas estatísticas de redes complexas podem esclarecer essa questão. (Yu et al., 2023)

De acordo com Yu et al (2023), as linhas de metrô se espalham no espaço e evoluem ao longo do tempo como resultado do acúmulo de investimentos em infraestrutura. A possível ligação entre seus padrões e desempenho no atendimento às necessidades urbanas torna-se uma curiosidade compartilhada pelo planejamento urbano, engenharia de infraestrutura e também ciências sociais. (Yu et al., 2023)

No entendimento de Yu et al (2023), um aglomerado de linhas de metrô pode ser considerado como uma rede complexa com as estações (como juntas de rede) conectadas por segmentos de linha (como arestas de rede), uma vez que revela as características de redes complexas, como características de

⁷ O efeito de transbordamento é um evento econômico em um contexto que ocorre por causa de outro evento em um contexto aparentemente não relacionado. Por exemplo, eventos aparentemente não relacionados em uma nação podem ter impacto nas economias de outras nações. Embora existam efeitos colaterais positivos, o termo é mais comumente aplicado ao impacto negativo que um evento doméstico tem em outras partes do mundo, como um terremoto, crise do mercado de ações ou outro evento macro.

⁸ Disponível em: <https://www.modernrailways.com/article/jubilee-line-extension>

mundo pequeno e propriedades livres de escala que não existem em redes regulares e aleatórias. Múltiplas partes dependentes e interativas complicam ainda mais as redes metropolitanas.

Neste sentido, esforços foram feitos para caracterizar as redes metropolitanas com métricas desenvolvidas no âmbito da análise de redes complexas. As estruturas topológicas das redes metropolitanas são caracterizadas por uma série de indicadores prontamente definidos para redes complexas, como o grau, o comprimento do caminho característico, o coeficiente de agrupamento, a importância do nó, a franqueza e a eficiência da rede. Além disso, para especificar as funções das redes de metrô como um componente-chave dos sistemas de transporte público urbano, estudos foram dedicados a vincular as métricas às características desejadas dos sistemas de metrô, como conectividade, acessibilidade, robustez, confiabilidade e resiliência. (Yu et al., 2023)

Yu et al (2023) também destaca que a teoria da rede complexa também é poderosa para ilustrar a evolução da rede de maneira subjetiva e quantitativa, fornecendo suporte científico para a tomada de decisão do planejamento urbano.

Neste artigo Yu et al (2023) também traz um estudo relevante sobre a distinção dos tipos ou fases de redes metropolitanas, através de um estudo de Yang e Chen (2018) sobre o processo de evolução da rede do sistema de metrô de Xangai de 1993 a 2020, com base em indicadores topológicos de rede complexa, e dividiram a evolução em duas etapas, ou seja, densificação e extensão da rede. Além disso, no estudo de Li (2016) identificou três tipos de redes, rede esqueleto, rede de crescimento e rede madura, de sistemas de metrô de 56 cidades de acordo com uma análise de cluster realizada em seis métricas. (Yu et al., 2023) (Yang & Chen, 2018) (Li, 2016)

2.6. MELHOR CONECTIVIDADE E ACESSIBILIDADE NO TECIDO ESPACIAL URBANO

Para Morales et al (2017), a questão da acessibilidade, o conceito refere-se à facilidade de chegar a uma atividade a partir de um determinado local usando um sistema de transporte específico. A métrica de acessibilidade serve como método de estudo e elemento fundamental da estrutura espacial urbana; estudar acessibilidade ajuda a obter uma compreensão clara da evolução da estrutura espacial urbana. (Huang, 2020)

Neste sentido, o índice de acessibilidade expressa a localização da hierarquia da estrutura urbana, e classificar e agrupar as áreas das estações com base no índice de acessibilidade das estações de metrô pode ajudar a entender o papel e a hierarquia de uma área na estrutura espacial urbana geral. (Song et al., 2023)

No estudo de Chen (2014), o crescimento e a acessibilidade da rede de trânsito rápido tem relação com o desenvolvimento urbano usando modelagem espaço-temporal e topologia de rede, constatando que a expansão espaço-temporal e a evolução da acessibilidade da rede metropolitana coincidiram com a evolução do crescimento urbano e da distribuição da população e, que o núcleo urbano foi cercado por áreas com os maiores valores de acessibilidade que gradualmente se expandiram para fora do núcleo. (S. Chen et al., 2014)

Portanto, com a acessibilidade do metrô gradualmente teremos um impacto maior no desenvolvimento urbano do que a acessibilidade das estações de ônibus, pois a promoção da construção do metrô para melhorar a acessibilidade espacial desempenha um papel cada vez maior no desenvolvimento urbano sustentável. (S. P. Chen et al., 2014) (Zhou & Yang, 2021)

3.

METODOLOGIA

Para esse trabalho de dissertação, uma revisão da literatura foi aplicada, um método de pesquisa exploratória para sintetizar e avaliar criticamente a pesquisa em um tópico específico de acordo com uma perspectiva pré-definida. Nesta revisão da literatura foi aplicada, um método de pesquisa exploratória para sintetizar e avaliar criticamente a pesquisa em um tópico específico de acordo com um problema pré-definido (Denney & Tewksbury, 2013).

A metodologia exploratória utilizada nesta pesquisa, que tem como objetivo investigar e compreender de forma ampla o fenômeno em estudo. A abordagem exploratória é essencial para coletar informações preliminares, identificar padrões, estabelecer conexões e delinear possíveis hipóteses. Por meio dessa metodologia, buscamos obter uma visão aprofundada e abrangente do tema, permitindo que etapas futuras da pesquisa sejam fundamentadas em uma base sólida de conhecimento.

A revisão tem por objetivo reconhecer áreas que requerem mais consideração dos pesquisadores e unificar os conceitos disponíveis. Com isso foram analisados tendências e cenários de mobilidade, num conceito de rede metrô em cidade desenvolvidas, na qual estes cenários fornecem insights sobre os detalhes tecnológicos e socioeconômicos das alterações como uma proposta conceitual e, para apoiar a tomada de decisões em circunstâncias incertas, especialmente para planejamento de longo prazo. (Bishop et al., 2007) (Wee & Banister, 2016)

O critério desta pesquisa exploratória foi baseado em palavras-chave para encontrar artigos, como futuro da mobilidade, planejamento, metrô, aumento populacional, transporte sustentável, sistema de metrô em rede. A data de publicação dos resultados ficou definido num intervalo de tempo para artigos publicados entre 2010 e início de 2023, sendo considerados para identificar as tendências de pesquisa dos últimos anos. Contudo, durante a análise dos resultados foi necessário tratar de artigos datados em 2006, devido a sua importante relevância sobre o assunto.

A análise de documentos relevantes, como relatórios, estudos anteriores, artigos científicos e regulamentos, contribuiu para uma análise mais abrangente do tema explorado. Essa abordagem permitiu identificar tendências, lacunas e informações relevantes para o desenvolvimento deste trabalho de dissertação.

Em relação a confiabilidade e idioma, foram considerados artigos publicados em revistas científicas internacionais com revisão por pares em inglês e português. A seleção de banco de dados como mecanismos de pesquisa, foi em bases de dados abrangentes, confiáveis e de fácil acesso, sendo selecionadas: Google Scholar, ScienceDirect, Tandfonline, Scopus, ResearchGate, Microsoft Academic, IEEE Explore, Web of Science.

Quanto a seleção de palavras-chave, foi pesquisado artigos que incluam cenários ou previsões de mobilidade urbana e artigos relacionados a mobilidade urbana ou transporte urbano de passageiros. Foram aplicadas 10 palavras-chave: “mobilidade urbana”, “transporte”, “mobilidade futura”, “transição de transporte urbano”, “cenários de mobilidade”, “alteração da mobilidade urbana”, “mobilidade integrada”, “metrô em rede”, “sistema de metrô”.

Para refinar e otimizar a pesquisa foram utilizadas múltiplas palavras-chave e determinação de pares de palavras-chave para melhorar o processo de busca, sendo aplicados operadores booleanos para pesquisas “OR” com termos de pesquisa semelhantes para ampliar o número de registros sobre mobilidade futura, independentemente de qual termo é usado no documento, bem como pesquisas “AND” para restringir a pesquisa e capturar documentos em que ambos os conceitos aparecem.

A metodologia exploratória adotada nesta pesquisa foi essencial para a obtenção de uma compreensão profunda e holística do fenômeno em estudo. Através da coleta e análise de dados qualitativos, buscou identificar padrões significativos para fornecer uma base sólida para as etapas subsequentes da pesquisa. A riqueza dos insights obtidos foi fundamental para contribuir com a discussão acadêmica e prática sobre o tema investigado.

4.

RESULTADOS

4.1. VISÃO GERAL

Neste capítulo será abordado os resultados das pesquisas sobre a os sistemas de metrô em rede, na qual foi realizado diversas buscas a artigos científicos confiáveis e revisados, que fornecessem um caminho metodológico para entender cientificamente como evolui ou como deve evoluir um sistema de metrô, entender e analisar o funcionamento, bem como calcular de forma fundamentada a eficiência e eficácia da rede.

4.2. OS METRÔS COMO UM SISTEMA EM REDE

Revisado a literatura sobre o Planejamento de Mobilidade em rede, neste capítulo iremos implementar aplicar o estudo de sistema de metrô em rede. Dentro da literatura, temos o estudo de Derrible e Kennedy (2010), “The complexity and robustness of metrô networks”, na qual observaram 33 sistemas de metrô no mundo, e adapta metodologias de ciência de rede à literatura de transporte e oferece uma aplicação para a robustez dos metrôs.

Na visão de Derrible e Kennedy, o planejamento de sistemas de transporte é um processo multifacetado que pode se mostrar extremamente complexo. Uma característica relevante dos sistemas de transporte é que eles são redes físicas. Embora existam muitas abordagens tradicionais para analisar redes de transporte, o campo da ciência de rede pode ser particularmente valioso para ajudar os planejadores e operadores de transporte. (Derrible & Kennedy, 2010)

As redes de metrô desempenham um papel fundamental no transporte urbano, proporcionando um meio eficiente de deslocamento nas grandes cidades. Este capítulo explora as características distintivas das redes de metrô e discute os desafios enfrentados em sua implementação e operação. As informações aqui atribuídas são desenvolvidas em estudos e pesquisas relevantes sobre o assunto.

Os sistemas de metrô são, na verdade, redes, onde os nós são estações e os links são trilhos. O campo matemático da teoria dos grafos é normalmente usados para coletar informações sobre redes, que considera as redes como grafos (Derrible & Kennedy, 2010).

A figura 8 mostra a representação gráfica do metrô de Montreal; na figura 9 temos a representação gráfico do metrô de Montreal, que foi utilizada para ilustrar alguns dos conceitos. O sistema de metrô de Montreal tem um número nL de quatro linhas (representadas como 'contínuo', 'ponto', 'traço' e 'traço longo' conforme a figura 9) e um total de 68 estações.



Fig. 8 - Mapa de rede de metrô de Montreal.

Fonte: (Derrible & Kennedy, 2010)

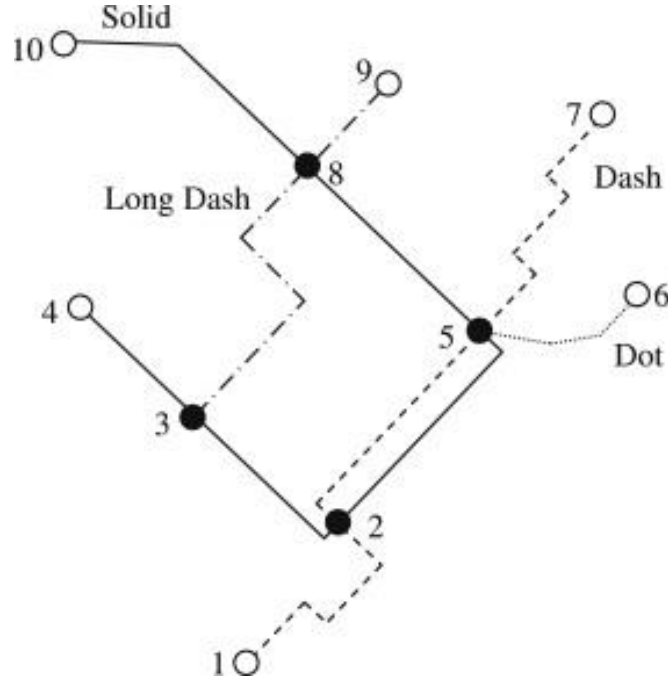


Fig. 9 - Representação da rede metropolitana de Montreal como um grafo, que foi utilizada para ilustrar alguns dos conceitos, temos que o sistema de metrô de Montreal tem um número nL de quatro linhas, representadas como 'contínuo', 'ponto', 'traço' e 'traço longo', num total de 68 estações.

Fonte: (Derrible & Kennedy, 2010)

Conforme Derrible e Kennedy (2010), uma rede de trânsito pode ser representada como um grafo não direcionado $G = \{V, E\}$, composto por um conjunto de vértices V (nós; aqui estações) e arestas E (links; aqui trilhos). Cada vértice $v \in V$ é atribuído um valor ' ℓ ' do número de linhas que está hospedando. Essencialmente, contamos o número de linhas que passam por cada estação v , resultando em uma matriz unidimensional L por sistema de trânsito. Do nosso conjunto de dados, as estações hospedam de 1 a um máximo de 6 linhas (ou seja, $1 < \ell < 6$). Cada vértice também recebe um número de identificação (por exemplo, na figura 9, vértices 1–10).

De acordo com Derrible e Kennedy (2010), na pesquisa eles particularmente não consideraram todos os vértices semelhantes. Primeiro distinguimos entre dois subconjuntos conjuntos de $V = \{Vm, V_d\}$: as estações monotônicas Vm e as estações diatônicas V_d de tal modo que $V = Vm \cup V_d$. As estações diatônicas são divididas em dois subconjuntos $V_d = \{V^t, V^e \subseteq V\}$; eles são o conjunto de estações de transferência V^t (círculos pretos na Figura 9) por um lado e o conjunto de terminais ou estações finais (círculos brancos na Figura 9 por outro lado; a equação 1 oferece uma representação matemática das estações diatônicas. Observe que, se um terminal também for uma estação de transferência, ele será considerado apenas como uma estação de transferência v^t (desde $\ell > 1$).

$$|V_d| = |V^t| + |V^e| = \sum_i v_{d,i,\ell} = \sum_i v_{d,i,\ell > 1} + \sum_i v_{d,i,\ell=1} \quad (1)$$

Onde, $v_{d,i,\ell}$ é um elemento de V_d com número de identificação i' como mostrado na figura b acima, e atributo de linha ' ℓ ' representando o número de linhas hospedadas. (Derrible & Kennedy, 2010)

Conforme Derrible e Kennedy (2010), as estações monotônicas são todas as outras estações (não representadas na figura b, mais os terminais, ou seja, todas as estações sem transferência; eles são denominados monotônicos porque hospedam apenas uma linha, razão pela qual os terminais também estão presentes no subconjunto Vm de V tal modo que $V_d \cap Vm = V^e$. Além disso, observe que na

Equação 2, o atributo ' ℓ ' não é necessário, pois todas as estações hospedam apenas uma linha.

$$|Vm| = \sum_i v_{m,i} \quad (2)$$

onde, $v_{m,i}$ é um elemento de Vm com número de identificação i .

No estudo de Derrible e Kennedy (2010), eles demonstraram que da mesma forma, existem dois subconjuntos de arestas $E = \{M, D\}$: monotônico M (ligando todo $v_{m,i}$ vértices) e diatônico D . O primeiro não foi necessário para esta pesquisa em questão, pois eles usaram essas informações. Outra questão, eles observaram não há formulações matemáticas para relacionar E com D e M . As arestas diatônicas conectam os vértices diatônicos conforme representado na Figura 9.

Segundo Derrible e Kennnedy (2010), em um grafo, arestas são consideradas para ligar vértices ' i ' para ' j '. Portanto, pode-se calcular uma matriz $\{d_{ij}\}$ de dimensão $|V^t| \cdot |V^t|$, contendo o número de arestas diatônicas, ou seja, '0' para nenhuma aresta, '1' para uma aresta, '2' para duas arestas (linhas sobrepostas), etc. Como é simétrico, no entanto, o total precisa ser dividido pela metade para produzir o número líquido de arestas. Além disso, para levar em consideração a propriedade da linha sobreposta, foi definido dois subconjuntos de arestas $D = \{D^s, D^m \subseteq E\}$: sozinho D^s (quando $d = 1$) e arestas múltiplas D^m (quando $d > 1$). No caso de arestas múltiplas, atribuímos uma aresta como única e as outras múltiplas (a lógica aqui é contar o número 'líquido' de caminhos independentes). Por exemplo, se $d = 2$, atribuímos uma aresta para fazer parte de D^s e o outro para fazer parte D^m ; Equação 3 oferece uma representação matemática. A Figura 9 mostra apenas o V_d vértices e ilustra $\{d_{ij}\}$.

$$|D| = |D^s| + |D^m| = \frac{1}{2} \sum_{ij} d_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{ij} \begin{pmatrix} s & m \\ d & +d \\ ij & ij \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left[\sum_{ij} \cdot \frac{d_{ij}}{d_{ij}} + \sum_{ij} \cdot \left(d_{ij} - \frac{d_{ij}}{d_{ij}} \right) \right], d_{ij} \neq 0 \quad (3)$$

onde, d_{ij} é um elemento de D vértice de ligação ' i ' para o vértice ' j '.

Outra medida útil para este exercício é o número de conexões b em um vértice v , daí a matriz unidimensional B . Em essência, é o número de arestas por vértice; é definido como:

$$b_i = \sum_j \cdot e_{ij} \text{ para um dado } v_i \quad (4)$$

onde, b_i é o número de conexões do vértice ' i ', e e_{ij} é um elemento de E , conectando o vértice ' i ' para o vértice ' j '.

Observemos que b é calculado para todas as arestas (diatônicas e monotônicas). O número médio de conexões para toda a rede é denotado $\bar{B}$.

Por fim, eles também coletaram o número máximo de transferências δ necessários para ir de um vértice a outro tomando o caminho mais curto. Isso geralmente é chamado de *diâmetro da rede*; porém, aqui, contabilizamos a presença de linhas, valores de δ são, portanto, muito mais baixos do que seriam de outra forma, o que faz uma diferença significativa na próxima análise. Observemos também que há apenas um valor de δ por sistema de metrô (ou seja, o caminho mais curto mais alto). (Derrible & Kennedy, 2010)

Abaixo, no estudo de Derrible e Kennedy (2010), eles coletaram as medidas da rede de metrô de Montreal, ressaltando que a rede não possui arestas múltiplas.

Tabela 1 - Medidas de rede coletadas para o sistema de metrô de Montreal.

Fonte: (Derrible & Kennedy, 2010)

R: Indicadores básicos											
Medir				Símbolo				Tamanho ou valor			
Linhas				nL				4			
Vértices				V				68			
Vértices monotônicos				v'				64			
vértices diatônicos				v				10			
Fim				v^e				6			
Transferir				v^t				4			
Arestas				E				69			
arestas monotônicas				e'				53			
arestas diatônicas				e				11			
Sozinho				e^S				11			
Múltiplo				e^m				0			
Conexões médias				β				1.10			
max. número de transferências				δ				2			
B: Matriz de atributo de linha											
v_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
l_i	1	2	2	1	3	1	1	2	1	1	
b_i	1	4	3	1	5	1	1	4	1	1	
C: Matriz de arestas											
$\{e_{ij}\}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	3
3	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	3
4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	4
6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
8	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	4
9	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Total	1	3	3	1	4	1	1	4	1	1	20
Total efetivo										10	

4.3. REDES SEM ESCALA

Neste estudo, a complexidade foi definida pela característica livre de escala das redes, bem como pelo comportamento de mundo pequeno. Os mundos pequenos referem-se ao ditado comum de que estamos todos conectados por meio de seis graus de separação. As redes de mundo pequeno foram bem definidas matematicamente por Watts e Strogatz. (Watts & Strogatz, 1998)

Conforme Derrible e Kennedy (2010), o comportamento livre de escala de algumas redes, conforme definido por Barabási e Albert (Barabasi & Albert, 1999), é uma das contribuições mais significativas para o campo. Considere um gráfico $G = \{V, E\}$; tem um padrão sem escala se a função de densidade de probabilidade f que um vértice tem conexões (número de arestas conectadas ao vértice) segue uma lei de potência:

$$f(b)ab^{-\varepsilon} \quad (5)$$

Nesta equação 5, ao amostrar vértices aleatoriamente, a distribuição segue uma lei de potência. O expoente ε é chamado de fator de escala. Para sistemas de transporte público, estamos mais interessados no número de linhas l passando por um vértice v ; portanto, é preferido usar $f(l)\alpha l^{-\varepsilon}$. Em outras palavras, se tomarmos todas as estações v de um sistema e identificar aqueles que hospedam uma linha, duas linhas, etc, e se o gráfico de frequência decair seguindo uma lei de potência, então é uma rede sem escala. Isso se traduz em ter muitas estações hospedando apenas uma linha e poucas estações hospedando mais de uma linha. (Derrible & Kennedy, 2010)

Devido ao pequeno número de pontos de dados (de dois a seis para cada sistema de metrô), é difícil calcular um valor estatisticamente rigoroso para ε . O uso de uma abordagem de estimativa de máxima verossimilhança (MLE), combinada com um teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) é preferível para ajustar distribuições de lei de potência. Neste estudo, Derrible e Kennedy, não utilizaram o método MLE devido ao pequeno número de observações; e conforme estudos, os primeiros testes mostraram claramente resultados estranhos. Uma abordagem mais comum foi realizar uma regressão ordinária de mínimos quadrados (OLS) para valores log-log dos pontos de dados. A função de frequência f essencialmente assume a forma (Derrible & Kennedy, 2010):

$$\ln(f(l)) = -\varepsilon \cdot \ln(l) + \ln(\alpha) \quad (6)$$

Na equação 6, o fator de escala ε é a inclinação da equação e o coeficiente de multiplicação α é a intercetação. A significância estatística da qualidade do ajuste (ajustada R^2) e os valores do t -teste são então examinados. A partir da literatura, no entanto, parece que esse método pode produzir resultados imprecisos, apesar da significância dos indicadores estatísticos. Portanto, no estudo decidiram realizar um teste adicional para validar se os modelos ajustados seguiram as distribuições da lei de potência. Basicamente, aplicaram um χ^2 -teste que é particularmente adequado para examinar distribuições de frequência. Este teste é definido como:

$$\chi^2 = \sum_i \left(\frac{Expected_i - Observed_i}{Expected_i} \right)^2 \quad (7)$$

Onde “ $Expected_i$ ” são valores calculados usando os resultados das regressões, e “ $Observed_i$ ” são os pontos de dados coletados; aqui, valores reais são usados, não a forma de log.

4.4. REDES DE “MUNDOS PEQUENOS”

Em relação aos “mundos pequenos”, na qual estamos todos conectados por meio de seis graus de separação, temos duas regras básicas (Derrible & Kennedy, 2010):

- Agrupamento Alto.
- Pequeno comprimento médio do caminho mais curto.

Na regra 1, agrupamento refere-se ao número de conexões entre os vértices de uma determinada vizinhança. Por exemplo, pegue um grafo não direcionado $G = \{V, E\}$ e considere um vértice v , a vizinhança k_v de v contém todos os vértices que estão conectados a v ; há, portanto, tantos bairros quanto vértices, embora nem todos sejam distintos. O coeficiente de agrupamento C_v então calcula o número total de arestas existentes dentro desta vizinhança k_v , dizer e_v , para o número máximo de arestas que podem existir, $e_v^{\max} = k_v(k_v - 1) / 2$ (ou seja, se todos os vértices da vizinhança estivessem conectados entre si).

$$c_v = \frac{e_v}{e_v^{\max}} = \frac{2 \cdot e_v}{k_v \cdot (k_v - 1)} : v \in V \quad (8)$$

O agrupamento geral de uma rede é calculado como a média de todos os coeficientes de agrupamento:

$$C = \frac{1}{|V|} \sum_i C_i \quad (9)$$

Embora essa medida seja comum para estudar propriedades de redes de mundo pequeno, ela apresenta dois problemas no caso particular de redes metrôpolitanas. Primeiro, não leva em conta a propriedade planar das redes metrôpolitanas (ou seja, o cruzamento de duas arestas criará um vértice). De facto, o número total de arestas potenciais é calculado como $k_v \cdot (k_v - 1) / 2$, enquanto para grafos planares o número de arestas potenciais é $3 \cdot k_v - 6$ (para grafos com mais de três vértices). (Derrible & Kennedy, 2010)

Devido ao fato de neste estudo eles estarem a lidar com grafos pequenos, foi optado por usar um indicador, que é comum na literatura de teoria dos grafos, e introduzido pela primeira vez no transporte por Garrison e Marble (Garrison & Marble, 1961). Refere-se como o grau de conectividade γ é amplamente utilizado em pesquisa de rede pela comunidade de transporte. (Derrible & Kennedy, 2010). Considerando a propriedade planar, ou seja, para grafos G com $|V| \geq 3$ e e_G arestas, o número máximo de arestas é $e_G^{\max} = (3 \cdot |V| - 6)$, o grau de conectividade γ é:

$$\gamma = \frac{e_G}{e_G^{\max}} = \frac{e_G}{3 \cdot |V| - 6} \quad (10)$$

Conforme Derrible e Kennedy (2010), o comprimento médio do caminho mais curto é calculado como a média de todo o número máximo de transferências tomando o caminho mais curto para conectar cada vértice. Para seguir a propriedade do mundo pequeno, o diâmetro deve estar abaixo do logaritmo do número de vértices: $\ln|V|$. Naturalmente, as redes de transporte público devem ser tratadas de maneira diferente devido à presença da linha.

4.5. O CONCEITO DE ROBUSTEZ

Em relação a robustez, Derrible Kennedy (2010) afirmam que o conceito de robustez é de fundamental importância quando se estuda redes, pois a robustez dos sistemas de metrô impacta sua capacidade de oferecer rotas alternativas durante a ocorrência de falhas, acidentes ou mesmo ataques direcionados. Na literatura científica de rede, um indicador de robustez particularmente adequado é o conceito de associatividade que foi introduzido por Newman (Newman, 2002) (Newman, 2003). Ele basicamente mede quanto nós com índices de conexão b estão ligados a outros nós com índices de conexão semelhantes b . Primeiro, convertamos as matrizes $\{d_{ij}\}$ e B em uma matriz $\{f_{ij}\}$ do índice de conexão de modo que cada célula seja uma fração da soma tal que:

$$\sum_{ij} f_{ij} = 1, \quad \sum_{ij} f_{ij} = a_i, \quad \sum_{ij} f_{ij} = b_j, \quad (11)$$

A Matriz $\{f_{ij}\}$ portanto, tem tantas linhas e colunas quantos forem os valores discretos de b . O coeficiente de associatividade r é calculado como:

$$r = \frac{\sum_{ij} f_{ij} - \sum_i a_i b_i}{1 - \sum_i a_i b_i} \quad (12)$$

Com isso, o valor de r varia de -1 (completamente desassortativo) a 1 (completamente assortativo). Em uma rede seletiva, os nós estão ligados a outros nós com um índice de conexão semelhante. Esse tipo de rede é mais robusto, pois remover um nó altamente conectado deixará o comprimento do caminho relativamente intacto. Aqui, novamente, porém, esse conceito não pode ser aplicado a redes de trânsito. (Derrible & Kennedy, 2010)

Um fator importante que Derrible e Kennedy trouxeram é que nas redes metrôpolitanas, a maioria das estações são monotônicas, ou seja, a maioria das estações ao longo de uma linha são monotônicas e conectadas a outras estações monotônicas, o que significa que a maioria das redes metrôpolitanas são seletivas, independentemente do tamanho da rede. Da mesma forma, redes metrôpolitanas menores costumam ser mais seletivas porque têm menos índices de conexões possíveis, ou seja, suas estações de transferência oferecem uma ou duas transferências em comparação com redes maiores que podem ter até seis transferências.

Portanto, considerando que, na realidade, metrô maiores tendem a ser mais confiáveis, pois oferecem mais alternativas para ir do ponto A ao ponto B; conseqüentemente, tendem a ser mais robustos. Enquanto uma medida de robustez das redes metrôpolitanas precisa refletir essa propriedade, o conceito de assortatividade claramente não, ainda se apenas os vértices diatônicos forem considerados. (Derrible & Kennedy, 2010)

Posto isso, para calcularmos o número total de caminhos disponíveis ou rotas alternativas, podemos usar o número ciclomático μ conforme foi definido por Berge (Berge, 2001), que calcula o número de ciclos, ou seja os circuitos ou *loops*, em um gráfico subtraindo o número de arestas em uma árvore, $|V_d| - 1$, para o número de arestas $|D|$. (Derrible & Kennedy, 2010)

$$\mu = |D| - |V_d| + 1 = \frac{1}{2} \sum_{ij} d_{ij} - \sum_i v_{d,i} + 1 \quad (13)$$

Neste ponto, Derrible e Kennedy observa que estão usando os vértices diatônicos e as arestas diatônicas, pois não pode haver ciclos em suas contrapartes monotônicas por definição. Contudo, ainda é necessário calcular o número “líquido” de ciclos subtraindo o número total de arestas múltiplas. Ademais deve ser contabilizada a probabilidade de falhas ou acidentes, que é altamente dependente do tamanho da rede; ou seja, mais estações podem induzir uma maior probabilidade falhas aleatória. Posto isso o indicador de robustez r^T é:

$$r^T = \frac{\mu - |D^m|}{|V|} = \frac{\frac{1}{2} \sum_{ij} d_{ij} - \sum_i v_{d,i} - \frac{1}{2} \sum_{ij} d_{ij}^m + 1}{\sum_i v_i} \quad (14)$$

onde “T” significa “trânsito”.

Notemos que, idealmente, teremos de levar em consideração os cruzamentos de via, que são de suma importância para a robustez do trânsito. Mas na realidade, quando ocorre uma falha, apenas os trechos de linha onde os trens podem mudar de direção são mantidos em operação. Com isso, mesmo que uma falha afete apenas uma estação, um segmento inteiro é frequentemente interrompido. Contudo, esta

informação não está disponível. (Derrible & Kennedy, 2010)

O resultado do estudo de Derrible e Kennedy (2010) ao examinar as redes metropolitanas usando este método apresentado, eles conseguiram compreender a complexidade das redes. Na tabela 6, no anexo, tem todos os resultados calculados para as 33 redes consideradas neste estudo. Sendo que o primeiro conjunto de dados são os indicadores básicos apresentados na Tabela 1. Na sequência, as matrizes de atributos de linha L são listados para cada rede. Podemos observar que os valores para l_1 são iguais ao número de estações monotônicas $|v_m|$.

Na tabela 7, no anexo, tem os resultados da regressão (fator de escala e coeficiente de multiplicação α) de todos os sistemas de metrô. A análise estatística só pôde ser realizada para todos os sistemas com mais de dois pontos de dados (ou seja, sistemas com estações que hospedam mais de duas linhas), o que diz respeito a um total de 19 metrô dos 33 estudados. Primeiro, foi relatado o ajuste R^2 , o t - valores de teste para ε e a raiz quadrada média da regressão coletada da análise de mínimos quadrados comum. Em seguida, adicionamos os graus de liberdade ($l \max - 1$), que são os valores usados para o χ^2 mesas, o χ^2 valores calculados e os valores de confiança de 95% das tabelas. Uma coluna final estipula se os resultados da regressão passaram no χ^2 - teste ou não usando os valores de confiança de 95%. (Derrible & Kennedy, 2010)

Conforme análise de Derrible & Kennedy (2010), foi verificado que desses 19 metrô, seis reprovaram o χ^2 - teste; cinco estão marcados com '*' e um (Londres) está marcado com '**' na Tabela 6, Tabela 7. De L matrizes desses seis sistemas, é compreensível porque o teste falhou. Primeiro, para Londres e Chicago, os valores para l_5 e l_6 são idênticos, o que discorda da natureza do ajuste, aumentando assim o χ^2 valor. Londres, no entanto, permanece bastante próximo do valor de confiança de 95%, e uma inspeção visual sugere a presença de uma distribuição de lei de potência, razão pela qual o valor ainda é considerado nas análises seguintes (marcado como '**' na Tabela 6, Tabela 7). Chicago, por outro lado, tem resultados estatísticos significativamente ruins. Isto é explicado pela rápida decadência de l_1 para l_2 e depois um certo nivelamento, que diminui artificialmente o valor do fator de escala; isso é representativo de sua estrutura de rede (poucas transferências, exceto por uma área no centro conhecida como "loop"). Uma observação semelhante pode ser feita com Xangai. Para os outros três metrô (Madri, Osaka e Seul), a decadência de parar é rápido, assim como a decadência de l_2 para l_3 , que cria uma transição descontínua. Desses seis metrô, apenas Londres é mantida, aumentando o número total de sistemas para 14.

Em relação aos mundos pequenos, Derrible & Kennedy (2010) destacaram que no estudo que eles observaram que obedecem a duas regras básicas. A primeira relaciona-se com o agrupamento ou agrupamento da rede, de modo que os nós estejam conectados uns aos outros. A segunda regra considera o comprimento do caminho para ir de uma seção da rede para outra, para confirmar que todos os nós são alcançáveis através de um caminho razoavelmente curto (ou seja, fazendo o menor número de transferências possível). (Derrible & Kennedy, 2010)

Quanto ao grau de conectividade, eles examinaram a primeira regra identificada por Watts e Strogatz. Na Tabela 2, todas as redes parecem estar relativamente agrupadas em comparação com outras redes da literatura, com valores variando de 0,39 (Delhi) a 0,71 (Chicago). Ao traçar o grau de conectividade versus um indicador do tamanho da rede (escolheram o número de vértices V aqui novamente), a Figura 10 abaixo mostra ainda outro resultado surpreendente, pois à medida que as redes crescem, elas tendem a se tornar mais conectadas. Da Equação 10, lembramos que o número de arestas potenciais aumenta linearmente com o número de vértices, e por um fator de aproximadamente três; redes maiores, portanto, precisarão construir mais arestas (ou seja, transferir vértices e vértices finais) para permanecerem conectadas uniformemente. Os sistemas atuais não apenas satisfazem esse critério, como redes maiores tendem a se tornar ainda mais agrupadas.

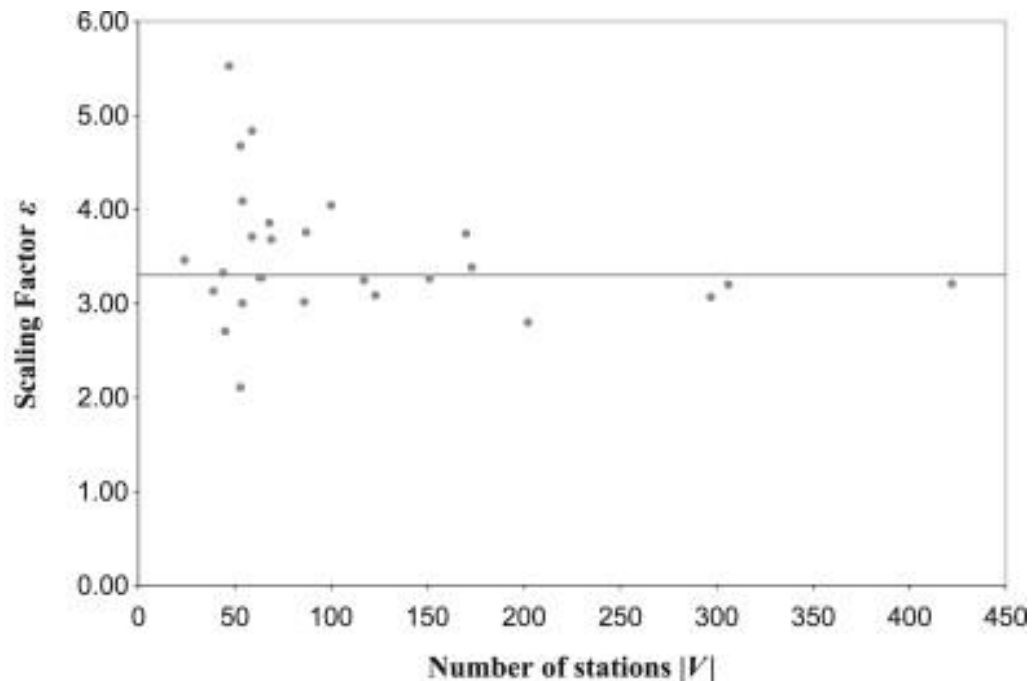


Fig. 10 - Relação entre o fator de escala ϵ e distribuição de frequência normalizada.

Fonte: (Derrible & Kennedy, 2010)

A segunda regra básica trata do diâmetro da rede. Como mencionado, a presença de linhas de trânsito muda drasticamente o problema. Portanto, podemos usar o número máximo de indicadores de transferência δ . Lembramos também que o valor de δ deve estar abaixo do log do número total de vértices: $\ln|V|$. Da Tabela 2, valores de $\ln|V|$ são sistematicamente menores que os valores correspondentes de $\ln|V|$. Portanto, é claro que todos os sistemas satisfazem esta regra. (Derrible & Kennedy, 2010)

Em resumo, o estudo descobriu que as redes metrôpolitanas são “mundos pequenos”. Além disso, as redes também seguem um comportamento inesperado ao se tornarem mais agrupados à medida que crescem em tamanho. (Derrible & Kennedy, 2010)

Por fim, Derrible e Kennedy (2010) concluíram que o campo da ciência da rede é uma área de estudo em rápido crescimento. As redes metrôpolitanas, por serem aplicações da vida real, são sistemas particularmente interessantes para estudar e certamente agregam uma contribuição significativa ao campo. A partir de anos 2000, dois tipos de redes foram descobertos e mudaram radicalmente o campo da ciência de redes; estas são **redes sem escala** e de **mundo pequeno**, conforme introduzido por Barabási e Albert e Watts e Strogatz, respectivamente. (Barabasi & Albert, 1999) (Watts & Strogatz, 1998)

Seguindo nos resultados, temos que na literatura sobre redes de transporte existem muitas contribuições notáveis que incluem Garrison e Marble, Kansky e Morlok. Mais especificamente, para redes de transporte público, Lam e Schuler, Musso e Vuchic, Vuchic e Musso e Vuchic fizeram um trabalho substancial. (Garrison & Marble, 1962) (Kansky, 1963) (Morlok Jr, 1967) (Lam & Schuler, 1982) (Musso & Vuchic, 1988) (Vuchic & Musso, 1991) (Vuchic, 2017)

4.6. AS REDES MUNDIAIS DE METRÔ

No entanto, no estudo de Angeloudis e Fisk (2006), título em original “*Large subway systems as complex networks*”⁹, eles afirmam que os princípios de engenharia civil dos sistemas de metrô são amplamente semelhantes em todo o mundo. Portanto, é plausível perguntar se os sistemas de metrô em nosso conjunto de dados podem ser descritos como membros, em diferentes estágios de evolução. (Angeloudis & Fisk, 2006)

Segundo Angeloudis e Fisk (2006), uma rede de metrô pode ser tratada como uma rede de viagens colocada em uma rede de substrato de linhas, ela própria colocada em uma rede de trilhos. Os vértices em uma rede de jornada consistem em estações, enquanto as arestas consistem no trecho de túnel que une estações fisicamente adjacentes. O que imediatamente distingue os metrôs de muitas outras redes complexas é que eles quase invariavelmente evoluem através da adição de cadeias (ou seja, novas 'linhas' ou 'extensões de linha') em vez de vértices únicos. Segue-se que tal rede será fortemente dominada por vértices de grau 2. Outros graus pares ocorrem onde duas ou mais linhas se trocam em uma estação e graus ímpares onde a nova linha se ramifica na extensão ou começa ou termina uma seção de compartilhamento de trilhos com linhas existentes. Isso pode ser visto no conjunto de dados resumidos na Figura 11, onde terminais isolados são plotados como tendo grau 1. (Angeloudis & Fisk, 2006)

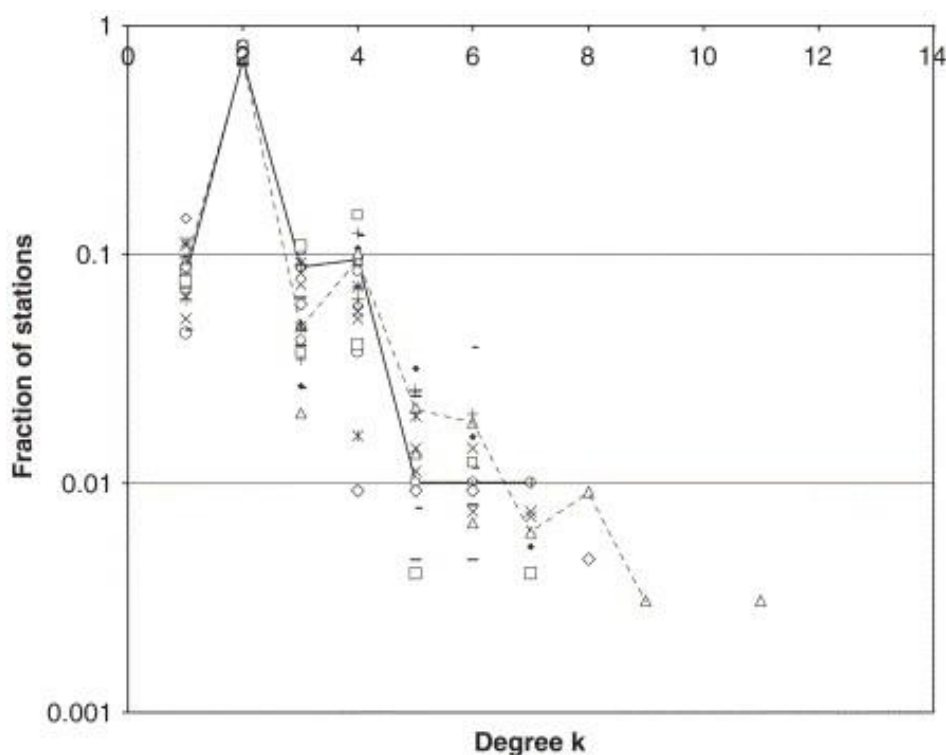


Fig. 11 - Distribuição de graus dos 20 maiores sistemas de metrô do mundo, na qual os terminais isolados são plotados como tendo grau 1.

Fonte: (Angeloudis & Fisk, 2006)

No estudo de Angeloudis e Fisk (2006), este conjunto de dados foi retirado dos maiores sistemas de metrô do mundo e construído a partir dos mapas disponibilizados pelas autoridades de trânsito na Web. Embora a intenção fosse coletar verdadeiros sistemas subterrâneos, na ausência de conhecimento local, foi adotado a definição de 'metrô' usada por essas autoridades. Dentro do conjunto, o intervalo médio de

⁹ Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437105011994>.

graus foi (2 (rede de 84 estações) -2,4 (rede de 326 estações)) e o intervalo médio de comprimento do caminho mais curto foi (6,7 (rede de 81 estações)—19,9 (rede de 420 estações)).

Embora esses números não sejam característicos de redes tradicionais de mundo pequeno ou sem escala, isso é esperado, pois uma rede que cresce adicionando cadeias é indiscutivelmente uma subclasse diferente de rede daquelas que crescem adicionando vértices únicos. (Angeloudis & Fisk, 2006)

Na Figura 11, as linhas indicam Paris e Londres como dois grandes metrô europeus 'clássicos' exibindo uma típica falta de caráter monotônico na distribuição de graus. O conjunto de dados também mostra considerável semelhança entre as cidades no número de vértices que compõem uma linha. Isso reflete em parte as restrições operacionais comuns, bem como a redução do custo-benefício da extensão da rede. (Angeloudis & Fisk, 2006)

4.7. UM METRÔ MODELO “BRINQUEDO”

Angeloudis e Fisk (2006) realizaram a investigação para verificar se as redes de metrô têm algum relacionamento com uma classe genérica, construíram uma rede de metrô 'brinquedo' como segue, a rede tem N estações não terminais (doravante referidas simplesmente como estações) e L linhas. Cada linha tem exatamente m estações, e possui apenas intercâmbios simples, portanto, é projetado sem criar ramificações, *loops* ou usar trilhos compartilhados na rede de viagens. Os terminais estão na periferia da rede e não são compartilhados entre as linhas. Com isso, todas as estações (não terminais) são de mesmo grau neste modelo. Nenhuma rede no conjunto de dados atende totalmente a esses requisitos rigorosos, mas mantém muitos de seus, sendo que os requisitos têm alguma base nas restrições operacionais e de engenharia civil de um sistema de metrô. (Garbutt, 1989) (Angeloudis & Fisk, 2006)

Portanto, neste estudo eles definiram que a distribuição de graus $PL(k)$ como a fração do N (não terminais) estações que possuem grau k (então $PL(k) = 0$ se k é ímpar). Suponhamos que uma nova linha de m estações seja adicionada, das quais (αm) conectam novos bairros à rede e o restante se junta a estações terminais existentes novamente sem formar ramificações ou *loops*, de modo que todas as estações permaneçam com o mesmo grau. O número total de estações na rede aumentou para $(N + \alpha m)$. O número é a soma das estações de grau (par) k é agora $(N + \alpha m)P_{L+1}(k)$. Este número é a soma das estações de grau $(k - 2)$ que foram promovidas ao grau k pela nova linha, e as estações existentes de grau k que não foram incluídas na nova linha. Assim, se for deixado $\phi_L(k)$ ser a fração de estações de grau k que foram anexadas à nova linha. (Angeloudis & Fisk, 2006)

Para $k > 2$:

$$(N + \alpha m)P_{L+1}(k) = (NP_L(k - 2))\phi_L(k - 2) + NP_L(k) (1 - \phi_L(k)) \quad (15)$$

Para $k = 2$:

$$(N + \alpha m)P_{L+1}(2) = \alpha m + NP_L(2) (1 - \phi_L(2)) \quad (16)$$

Conforme Angeloudis e Fisk (2006), estas são condições gerais em qualquer rede simples. Com isso nos concentramos em juntar regras $\phi_L(k)$ desse resultado, pelo menos para grandes L , em distribuições de grau $P(k)$ que são independentes de L . As equações 15 e 16 agora fornecem uma relação de recorrência para $P(k)$:

$$P(k)\Phi(k) = P(k-2)\Phi(k-2) - \left(\frac{\alpha m}{N}\right) P(k), k, \text{par} > 2, \quad (17)$$

$$P(2)\Phi(2) = \left(\frac{\alpha m}{N}\right) (1 - P(2)), k = 2, \quad (18)$$

Ademais, a função de distribuição cumulativa do grau de estações (não terminais) (cdf) até o grau k' pode ser derivado de sucessivas somas da equação 17 começando com a equação 18. (Angeloudis & Fisk, 2006)

$$c. d. f. = \Sigma_{k=2}^{k'} = P(k) = 1 - \left(\frac{N}{\alpha m}\right) P(k')\Phi(k') \quad (19)$$

O número de linhas e o número de estações estão ligados por:

$$mL = N \Sigma_{k=2} \left(\frac{k}{z}\right) P(k) \quad (20)$$

De acordo com Angeloudis e Fisk (2006), estas são as relações gerais para qualquer regra de junção para a rede de metrô modelo “brinquedo” que leva a uma distribuição de grau estável.

Na sequência do estudo, Angeloudis e Fisk (2006), considerou o caso em que cada uma das estações existentes terem a mesma probabilidade de ser conectada à $(1 - \alpha)m$ e trocar conexões na nova linha. Neste caso $\Phi_L(k)$ é então independente de k ($= (1 - \alpha)m / N$) de modo que (Equação 17):

$$\frac{P(k)}{P(k-2)} = (1 - \alpha), \quad (21)$$

que requer que α seja independente de L , e produza uma distribuição de grau exponencial.

Existe alguma lógica de engenharia nesta forma analiticamente simples de $\Phi_L(k)$. Ainda que um novo intercâmbio com um vértice de alto grau naturalmente forneça muitas conexões a partir de uma única plataforma nova, ele apresentara o desafio de engenharia de tecer o novo túnel através do complexo existente ou escavar cada vez mais profundamente. Neste sentido, a capacidade da plataforma existente é fixa para que uma nova linha possa adicionar passageiros e congestionamento a um vértice de alto grau, enquanto um intercâmbio com um vértice de baixo grau pode realmente aliviar a pressão em outro lugar da rede. Com isso eles argumentaram que essa regra de união é, obviamente, uma hipótese. (Angeloudis & Fisk, 2006)

Com isso, usando a equação 18 na equação 21, a distribuição de grau normalizada é encontrada (Angeloudis & Fisk, 2006):

$$P(k) = \alpha(1 - \alpha)^{(k,2)-1}, k \text{ par}, = 0 \text{ } k \text{ ímpar.} \quad (22)$$

Da equação 5, $\alpha = N/(mL)$ para que:

$$c. d. f. = 1 - \left(1 - (N / (mL))\right)^{k/2} \text{ para } k \text{ par.} \quad (23)$$

Neste sentido, Angeloudis e Fisk (2006), trabalhando com o cdf para contornar os vértices de grau ímpar

nos dados do mundo real. Se m é interpretado como o número médio de estações por linha em qualquer rede real, não há graus de liberdade na equação 23 ao testá-la contra dados reais. Portanto eles concluíram que a comparação com dados reais é um teste severo à afirmação de que o sistema de brinquedo é genérico, conforme figura 13 abaixo, que mostra um gráfico de $\log(1 - cdf)$, contra k normalizado pela divisão por $\log(1 - (N/mL))$, que o modelo da equação 23 prevê ter uma inclinação de 0,5. Com isso eles concluíram que dados os pressupostos heroicos do modelo de brinquedo, o ajuste para a maioria das redes é convincente.

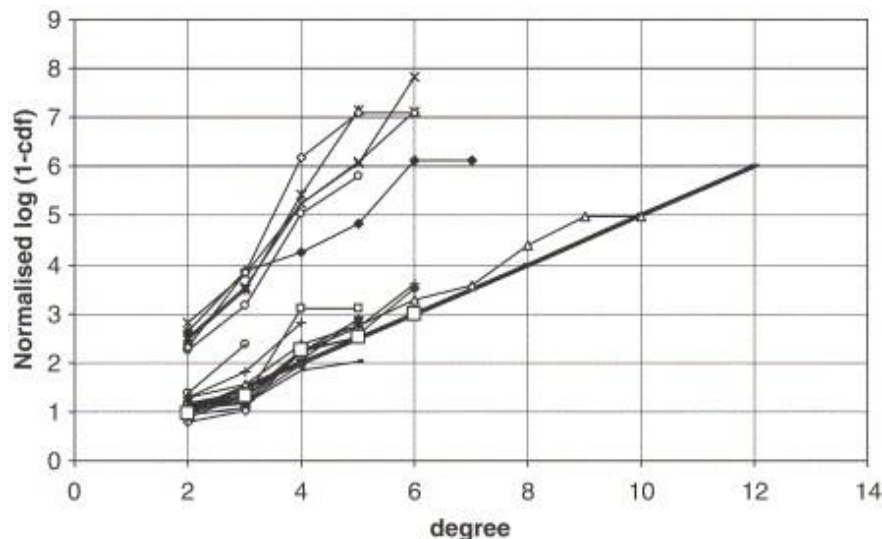


Fig. 12 - Log(1—cdf) normalizado em função do grau.

Fonte: (Angeloudis & Fisk, 2006)

Na análise da figura 13, os *outliers*¹⁰ formam um conjunto, e o problema é claramente que o modelo de brinquedo está superestimando consistentemente a distribuição de grau para vértices de grau mais alto. Voltando ao conjunto de dados, eles descobriram que este conjunto vem exclusivamente de metrô na Alemanha, tendo Nova Iorque uma relação próxima. (Angeloudis & Fisk, 2006)

Esses metrô têm em comum o fato de terem evoluído no início do século passado a partir de um sistema de transporte de superfície pré-existente, como um bonde. Estes costumavam usar trilhos compartilhados e geralmente tinham um único eixo passando pelas principais interconexões com outros transportes de superfície, como o ferroviário. Assim, não é surpreendente que esses metrô sejam caracterizados por uma via compartilhada significativa para muitas linhas. Uma nova linha pode adicionar interconexão de linha ao longo da trilha compartilhada sem aumentar o grau de jornada dos vértices, exceto onde a linha entra e sai da trilha compartilhada. (Angeloudis & Fisk, 2006)

A comparação com (N/Lm) a estimativa de α sugere um modelo genérico na qual cerca de 75% das novas interligações de linhas são por via compartilhada e, portanto, não contribuem para o grau de jornada. A correção de α dessa maneira alinha aproximadamente os dois conjuntos ao longo da mesma linha teórica na figura 13 acima, mas isso é indiscutivelmente um "ajuste" dos dados para o modelo. (Angeloudis & Fisk, 2006)

Em relação a forma simples de $\Phi_L(k)$, Angeloudis e Fisk afirmou que não é a única solução possível para a equação 17 e 18. Contudo, qualquer que mostre alguma preferência por conexões de alto grau

¹⁰ *Outliers* são dados que se diferenciam drasticamente de todos os outros.

tende a superestimar a distribuição de grau. Quanto a cada rede no conjunto de dados dele, existe uma idiossincrasia distintiva, por isso é duvidoso que haja um modelo genérico mais refinado a ser encontrado. E concluíram através da análise da figura 13 que pode ser significativo falar de um grande sistema de metrô como se fosse um membro de uma classe de redes complexas que se divide em duas subclasses relacionadas.

Por fim, Angeloudis e Fisk (2006), concluíram que as análises foram realizadas a partir de um banco de dados dos maiores sistemas de metrô do mundo, e mostraram que eles podem ser modelados como se fossem membros de uma das duas classes de rede genérica, ambos relacionados a uma distribuição exponencial com regras de montagem simples. Para a maioria dos sistemas de metrô, essa distribuição depende, aproximadamente, apenas da razão (mL / N) onde m é o número médio de estações não terminais, e L o número de linhas e o número total de estações não terminais na rede. (Angeloudis & Fisk, 2006)

4.8. COMO ANALISAR O DESEMPENHO DE UMA REDE METRÔPOLITANA

No estudo de Wu et al (2018), “*Analysis of metrô network performance from a complex network perspective*”¹¹, eles analisaram o desempenho de redes metrôpolitanas a partir de uma perspectiva de ciência de rede. Sendo revisado a eficiência estrutural das redes metrôpolitanas com base em uma estratégia de roteamento intuitiva para o passageiro que otimiza o número de transferências e a distância percorrida. Além disso, também foi verificado a robustez de uma rede metropolitana, analisando em vários cenários de ataque. O objeto de estudo foram seis redes metrôpolitanas, sendo a de Pequim, Londres, Paris, Hong Kong, Tóquio e Nova Iorque, comparadas em termos de probabilidade de ocupação do nó e alguns outros parâmetros de desempenho. (Wu et al., 2018)

As grandes cidades, devido ao aumento das demandas de tráfego e à cobertura cada vez maior da cidade, estão continuamente expandindo suas redes de metrô, resultando em complexos sistemas de metrô que possuem altas densidades de estações e complexos acoplamentos entre estações. (Wu et al., 2018)

Com isso Wu et al (2018) defende que o projeto e o planejamento de sistemas de metrô com o objetivo de otimizar o desempenho tornaram-se considerações significativas no desenvolvimento de sistemas de transporte público. Além disso, o estudo das redes, sob a perspectiva de redes complexas, tem ganhado popularidade recentemente devido à descoberta intrigante de uma série de propriedades universais em várias redes físicas e artificiais. (Watts & Strogatz, 1998)

Portanto, de acordo com Wu et al (2018), os resultados da pesquisa de redes complexas são altamente relevantes para o estudo de sistemas de transporte, especialmente no fornecimento de ferramentas analíticas apropriadas para caracterizar a estrutura de sistemas de metrô que são formas práticas de redes e para entender as operações de um sistema complexo como as redes de metrô.

Conforme Wu et al (2018), trabalhos anteriores aplicam principalmente a teoria de redes a sistemas de metrô sem considerar suas características inerentes para avaliar o desempenho topológico da rede. Contudo, as redes metrôpolitanas têm propriedades que as distinguem de outras redes, pois elas são compostas por linhas unidimensionais de estações (nós) e pontos de transferência onde diferentes linhas se sobrepõem para facilitar a troca entre linhas.

Um fator relevante destacado neste artigo é a questão da eficiência do transporte e a tolerância a falhas. Sendo que a eficiência do transporte é um parâmetro determinado pela propriedade estrutural inerente do sistema que permite que os passageiros se desloquem de uma estação para outra com o mínimo de

¹¹ Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437117308531>.

esforço. A tolerância a falhas de um sistema de metrô é um indicador da capacidade do sistema de manter sua função essencial quando algumas partes do sistema não funcionam normalmente devido a falhas de componentes ou ataques maliciosos intencionais. (Wu et al., 2018)

Em relação a eficiência da rede, denotada por E , introduzido por Latora (Latora & Marchiori, 2002) para avaliar a eficiência topológica de transporte de um sistema de metrô, que na definição E simplesmente inversamente proporcional à soma de todos os caminhos mais curtos (SP). Porém segundo Wu et al (2018), essa definição, no entanto, não é totalmente consistente com a operação do metrô, onde os passageiros não necessariamente escolhem um SP se envolver um número extra de baldeações. Ademais, segmentos de algumas linhas se sobrepõem, afetando o cálculo da eficiência do transporte. Como também tem havido uma quantidade considerável de estudos anteriores na avaliação da robustez ou tolerância a falhas de uma rede complexa. (Wu et al., 2018)

Portanto, neste estudo Wu et al (2018), a centralidade do nó foi avaliada usando a notação de centralidade de grau, centralidade de intermediação, centralidade de proximidade, autovetor de centralidade, e assim por diante. Em geral, cada método pode revelar um aspecto particular da centralidade do nó e pode ser adequado para uma aplicação. (Wu et al., 2018)

Na avaliação da robustez de um sistema metropolitano que sofre de falha aleatória e ataque malicioso, alguns nós são removidos aleatoriamente ou com base na centralidade do nó. Além disso, ao considerar a centralidade da estação de todo o sistema, as propriedades do tráfego devem ser levadas em consideração para descrever a centralidade da estação com mais precisão. São estudados os efeitos das variações de alguns parâmetros, como grau médio, caminho médio mais curto e eficiência, sobre o desempenho da rede. (Wu et al., 2018)

Com isso, Wu et al (2018) utilizaram a estratégia de roteamento de passageiros mais realista para estabelecer as possíveis rotas tomadas pelos passageiros de uma estação para outra e, redefiniram a eficiência da rede levando em consideração as estações sobrepostas. Também foi utilizada uma medida de centralidade, chamada probabilidade de ocupação de nós (NOP), para avaliar realisticamente o nível de utilização das estações. Quanto a robustez da rede foi analisada por meio de simulações detalhadas, através de dois índices, ou seja, taxa de rota desabilitada (DRR) e ajuste de custo (CA), para avaliar a influência de nós com falha no desempenho do tráfego.

No total seis redes de metrô foram estudadas e, os resultados da simulação mostraram que a rede de Nova Iorque tem melhor eficiência topológica, os sistemas de Tóquio e Hong Kong são os mais robustos sob falha aleatória e ataque ao alvo, respetivamente.

4.8.1. EFICIÊNCIA TOPOLÓGICA DE SISTEMAS DE METRÔ EM REDE

4.8.1.1. PROPRIEDADES TOPOLÓGICAS

Uma rede complexa com nós podem ser representados como um gráfico $G = (V, E)$, onde $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, denota o conjunto de nós, e $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ denota o conjunto de links. Um gráfico G pode ser totalmente descrito por uma matriz de adjacência A , que é um $N \times N$ matriz cuja entrada $a_{ij}(i, j = 1, \dots, N)$ igual a 1 se existe um *link* entre os nós i e j zero caso contrário. Neste trabalho, um nó é uma estação de metrô. Se duas estações estiverem conectadas diretamente por uma trilha, elas serão conectadas por um link. (Wu et al., 2018)

4.8.1.2. ALGORITMO DE ROTEAMENTO DO PASSAGEIRO

A rota percorrida por um passageiro que se desloca de uma estação para outra afeta a análise do desempenho da rede. Em particular, a eficiência topológica da rede depende da escolha das rotas pelos passageiros. Ao derivar uma estratégia realista de roteamento de passageiros, fazemos as seguintes suposições (Wu et al., 2018):

Suposição A

Os passageiros não têm pleno conhecimento do sistema de metrô. Eles não sabem o tempo exato que leva para viajar de um ponto de partida até o destino, incluindo o tempo para as transferências necessárias. Em outras palavras, um passageiro determina sua rota de acordo com o que ele percebe como a “melhor” rota. (Wu et al., 2018)

Suposição B

Os passageiros são tomadores de decisão que minimizam os custos. Eles escolherão as rotas que consideram incorrer no custo mínimo. (Wu et al., 2018)

Suposição C

O impacto do congestionamento dentro do veículo é insignificante, ou seja, os trens não devem parar no meio do trajeto entre as estações. (Wu et al., 2018)

No transporte de rede, vários algoritmos de roteamento foram estudados, como o algoritmo de caminho mais curto, o algoritmo de grau minimizado, o algoritmo de conscientização de tráfego, o algoritmo de roteamento eficiente, o algoritmo de roteamento local, o algoritmo da próxima estratégia de vizinho mais próximo, o algoritmo de roteamento híbrido e a estratégia de roteamento local. Contudo, esses algoritmos de roteamento são aplicados principalmente em redes de comunicação, nas quais as rotas são decididas pelo gerente do sistema com o objetivo de reduzir o congestionamento e melhorar a eficiência da transmissão de dados. (Wu et al., 2018)

No tráfego rodoviário, no entanto, a escolha da rota é a parte central da atribuição de tráfego. O projeto ótimo de qualquer sistema dado assume a adoção de uma estratégia de roteamento pelos passageiros que define a maneira como uma rota é escolhida entre um par origem-destino (OD) sob um critério específico, como o C-Logit, tamanho do caminho logit, logit aninhado generalizado e logit aninhado cruzado. Todas essas estratégias assumem que o custo de viagem “percebido” de uma rota C_{ij}^m para um passageiro é expressa como uma variável aleatória que consiste em um componente determinístico c_{ij}^m e um termo de erro aleatório aditivo ε_{ij}^m . Aqui, c_{ij}^m é o tempo de viagem, incluindo o tempo no veículo e as despesas gerais de transferência, e ε_{ij}^m é o erro de percepção. A probabilidade de um determinado caminho ser escolhido pode ser representada como a probabilidade de que C_{ij}^m é menor do que o custo percebido de todas as outras rotas, ou seja, (Wu et al., 2018):

$$p_{ij}^n = P(C_{ij}^n \leq C_{ij}^m, m \neq n) \quad (24)$$

Segundo Wu et al (2018), a maioria dos algoritmos de roteamento existentes são usados principalmente para análise de tráfego rodoviário e são focados principalmente na escolha de rota dos motoristas e não são totalmente consistentes com o tráfego ferroviário. **Na realidade, os passageiros não têm um conhecimento perfeito do tempo no veículo e das despesas gerais de transferência**, e a informação que os passageiros podem obter diretamente do mapa é o número de estações que precisam viajar e o

número de vezes que precisam mudar de uma linha para outro. Os passageiros têm diferentes níveis de percepção do comprimento da rota (número da estação) e sobrecarga de transferência. Além disso, as redes de metrô possuem estrutura e modo de operações especiais. Primeiro, uma rede de metrô consiste principalmente em linhas unidimensionais ao longo das quais não se espera nenhum congestionamento de tráfego. Ademais, a roteirização é realizada de forma distributiva, que significa, os passageiros escolhem suas próprias rotas. (Wu et al., 2018)

4.8.1.3. ROTEAMENTO INTUITIVO DOS PASSAGEIROS

Nesta parte Wu et al (2018), utilizaram um algoritmo de roteamento simples, mas realista, chamado de lógica intuitiva do passageiro (PIL). As intuições dos passageiros incluem minimizar o número de estações pelas quais eles precisam viajar, bem como a quantidade de sobrecarga de transferência. Assim, os passageiros intuitivamente adotariam uma abordagem combinada de caminho mais curto (SP) e caminho mínimo de transferência (MTP). Aqui, o caminho mais curto corresponde a um número mínimo de estações e, portanto, a um tempo mínimo no trem, mas pode incorrer em sobrecarga extra de transferência. Por outro lado, o caminho mínimo de transferência corresponde à rota que apresenta o menor número de tempos de baldeação, mas pode não garantir o menor tempo no trem.

Desta forma, uma estratégia de roteirização baseada na intuição dos passageiros pode ser concebida e representada pelas seguintes etapas:

Etapa 1: Obter o caminho mais curto (SP) $S_{ij}^{k_1} \cdot \{K_1 = 1, 2, \dots, m_1\}$ e série caminho mínimo de transferência (MTP) $m_{ij}^{k_2} \cdot \{K_2 = 1, 2, \dots, m_2\}$ entre estações i e j (o par OD), onde m_1 e m_2 são o número de caminho mais curto e número de caminho mínimo de transferência conectando o par OD, respetivamente.

Etapa 2: Deixe L_s denote o comprimento do caminho mais curto (SP) e L_m denote o comprimento do caminho mínimo de transferência (MTP). Por isso, $\varepsilon = L_m - L_s$ é a diferença de comprimento entre as duas rotas. Além disso, deixe C_s denote a contagem mínima de transferência de SP, e denotam a contagem de transferência de MTP. Então, $r = C_s - C_m$ é a diferença de contagem de transferência. Aqui, duas suposições são feitas. (1) Quando $\varepsilon \geq \lambda$, os passageiros não levarão em consideração o MTP, onde λ é o limite de divergência do comprimento da rota. (2) Quando $\gamma \geq \xi$, os passageiros não levarão em consideração SP, onde ξ é o limite de divergência de contagem de transferência de rota. Nesse estudo, $\lambda = 7$ e $\xi = 3$. Intuitivamente, mais passageiros preferem o caminho com menos contagens de transferência. Assim, a escolha do tipo de caminho de roteamento pode ser determinada pelas seguintes probabilidades empíricas (Wu et al., 2018):

$$P_{MTP} = \left(1 - \frac{\varepsilon^2}{\lambda^2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{(\gamma - \xi)^2}{\xi^2}\right), \text{ onde } \varepsilon \in [0, \lambda], \gamma \in [0, \xi]; \text{ e } P_{SP} = 1 - P_{MTP} \quad (25)$$

onde P_{MTP} é a probabilidade de tomar um caminho de transferência mínimo, e P_{SP} é a probabilidade de tomar um caminho mais curto. Podemos ver a partir desta equação empírica que P_{MTP} aumenta com o aumento de γ e diminuição de ε , conforme ilustrado na figura abaixo. Se o caminho mais curto for escolhido (SP) for escolhido, utilizamos a etapa 3 para determinar o caminho específico. Caso contrário, utilizaremos a etapa 4. (Wu et al., 2018)

Etapa 3: Escolha uma rota x_i de $s_{ij}^{k_1}$ com a seguinte probabilidade (Wu et al., 2018):

$$f(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{n_{min}} & \text{onde } Rx_i = n_{min} \\ 0 & \text{outra forma} \end{cases} \quad (26)$$

onde Rx_i denota o número de tempos de transferência do caminho x_i e n_{min} denota o número de caminhos com tempo mínimo de transferência.

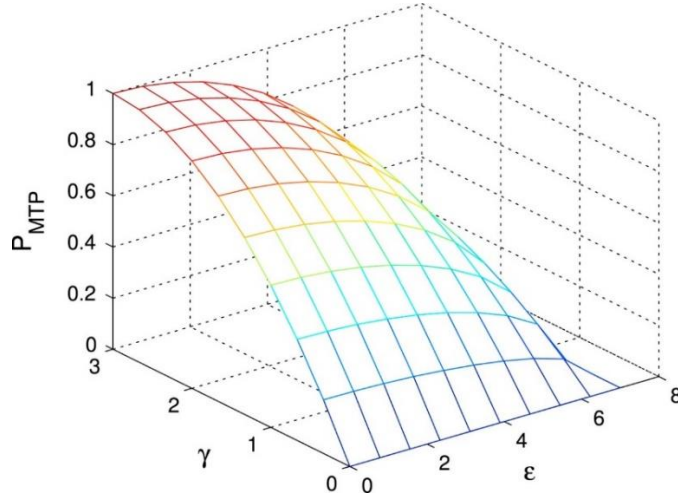


Fig. 13 - Probabilidade de decisão de roteamento intuitiva P_{MTP} .

Fonte: (Wu et al., 2018)

Na figura 12 temos a probabilidade de decisão de roteamento intuitiva, ou seja, probabilidade de escolher a rota com uma contagem mínima de transferência, versus diferença de contagem de transferência γ e diferença de comprimento do caminho ε , com limite de divergência de contagem de transferência de rota $\xi = 3$ e limite de divergência de comprimento de rota $\lambda = 7$. {Wu, 2018 #21}

Etapa 4: Escolha uma rota aleatoriamente de $m_{ij}^{k_2}$. (Wu et al., 2018)

4.8.2. EFICIÊNCIA TOPOLÓGICA METROPOLITANA

Conforme Wu et al (2018) havia citado anteriormente, a Eficiência E , que foi introduzida por Latora Marchiori, é uma medida de eficácia da troca de informações na rede. Denotado como ε_{ij} , a eficiência da transferência dos nós i para j tomado como sendo inversamente proporcional ao comprimento do caminho mais curto d_{ij} , neste sentido, temos (Wu et al., 2018):

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \forall i, j \quad (27)$$

sendo a eficiência da rede E definido como:

$$E(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (28)$$

Portanto Wu et al (2018), definiu que essa eficiência de rede mede a rapidez com que uma informação pode ser transportada por uma rede. No entanto, não é totalmente consistente com o sistema de metrô em dois aspetos. Primeiro, conforme analisado anteriormente, os passageiros não se concentram apenas no caminho mais curto, mas também na sobrecarga mínima de transferência. Em segundo lugar, quando segmentos de algumas linhas se sobrepõem, a eficiência do transporte será alterada. Para superar essas inconsistências, eles propuseram uma nova medida, a saber, a eficiência topológica metropolitana (MTE). (Wu et al., 2018)

Conforme Wu et al (2018), se o nó u e seu nó vizinho v estão conectados por várias arestas, escalaremos o link que conecta os dois nós por um fator w_{uv} :

$$w_{uv} = \frac{1}{n} \quad (29)$$

Na qual n é o número de arestas que conectam as estações, e esses links dimensionados são usados para calcular o comprimento de caminho mais curto “escalonado” r_{ij} . Portanto, a eficiência metropolitana é definida como (Wu et al., 2018):

$$MTE = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{r_{ij}} \quad (30)$$

Onde r_{ij} é o comprimento do caminho escalado selecionado pela intuição dos passageiros (PIL).

4.8.3. ANÁLISE DE ROBUSTEZ DO SISTEMA DE METRÔ

4.8.3.1. AVALIAÇÃO DA CENTRALIDADE DA ESTAÇÃO

Outro fator abordado no estudo de Wu et al (2018), é a Análise de robustez do sistema de metrô, que verifica a avaliação da centralidade da estação, robustez, modelo de ataque e indicadores de desempenho.

Em relação a avaliação da centralidade da estação, Wu et al (2018) traz que é um problema fundamental na ciência da rede avaliar a importância relativa do papel que um nó desempenha em uma rede, e isso ajuda a entender a característica estrutural da rede, para isso uma série de medidas foram propostas para este propósito, tais como centralidade de grau, centralidade de intermediação, centralidade de proximidade, probabilidade de ocupação do nó e assim por diante. A centralidade de grau descreve a importância de um nó em uma escala local, enquanto a intermediação e a proximidade podem refletir a importância de um nó em uma escala global. No entanto, todos eles são baseados no roteamento do caminho mais curto, o que ignora as características inerentes às redes de metrô (Wu et al., 2018). Com isso eles propõem um parâmetro chamado de probabilidade de ocupação do nó (NOP), denotado como $I(i)$, para descrever a importância da estação de metrô i :

$$I(i) = \frac{\sum_{u \in S} \sum_{\omega \in S} \rho_{u\omega}(i)}{N(N-1)} u \neq \omega \quad (31)$$

onde S é o conjunto de nós, N é o número total de nós, ρ é a probabilidade de que um caminho de nós para passa pelo nó i sob a intuição do passageiro (PIL). A probabilidade de ocupação do nó (NOP) pode

refletir diretamente o quão ocupada uma estação está e seu valor é proporcional ao número de rotas que passam por esta estação, indicando assim a influência estação no tráfego da rede. (Wu et al., 2018)

4.8.3.2. AVALIAÇÃO DE ROBUSTEZ

A rede metroviária é uma infraestrutura importante em qualquer cidade moderna, e sua resiliência é crucial para manter a função de transporte essencial em caso de falhas de componentes e ataques maliciosos. Houve uma série de estudos de robustez de rede ao longo dos últimos anos. A robustez estrutural é especialmente relevante para estabelecer a confiabilidade da rede, bem como em outras aplicações. A relação entre a estrutura topológica e robustez é, portanto, importante na implementação de gerenciamento e planejamento de segurança. (Wu et al., 2018)

4.8.3.3. MODELO DE ATAQUE

Os acidentes de metrô podem ser causados por mau funcionamento natural ou ataques maliciosos intencionais. Devido à incerteza dessas causas, classificamos as falhas em duas categorias, a saber, falha aleatória (RF) e ataque ao alvo (TA). Para implementar falhas aleatórias, eles selecionaram aleatoriamente alguns nós e os excluíram da rede. Além disso, para implementar ataques aos alvos e para fins de comparação, excluíram os nós que possuem o maior NOP e compararam os resultados com a exclusão de nós que possuem o maior valor intermediário. (Wu et al., 2018)

4.8.3.4. INDICADORES DE DESEMPENHO

Em relação a este indicador, neste estudo de Wu et al (2018), a ideia foi desdobrar a relação entre a estrutura topológica da rede e o desempenho do transporte da rede metroviária. Um aspecto é o impacto dos ataques no desempenho do metrô levando à remoção de todas as rotas que conectam um par Origem-Destino e à remoção da rota de menor custo. Desta forma, eles utilizaram dois parâmetros para avaliar a robustez do metrô, a saber, *razão de rota desabilitada* (DRR) e *ajuste de custo* (CA), na qual o custo se refere à soma dos pesos das arestas ao longo do caminho. A razão de rota desabilitada (DRR) é definido como a razão entre o número de rotas desabilitadas quando alguns nós são removidos da rede e o número total de rotas possíveis (Wu et al., 2018):

$$DRR = \frac{N_d}{N(N-1)} \quad (32)$$

Onde N_d é o número de pares Origem-Destino desconectados. Além disso, o ajuste de custo (CA) é definido como o ajuste de custo total, sendo:

$$CA = \frac{\sum_{ij}^f c_{ij}}{\sum c_{ij}} \quad (33)$$

Onde c_{ij}^f é o custo da rota entre nós i e j depois que alguns nós são excluídos e c_{ij} é o custo da rota entre nós i e j antes de serem excluídos. Todos os pares de nós i e j são considerados desde que ainda haja pelo menos uma rota entre os nós i e j após a remoção de alguns nós. Assim, o ajuste de custo (CA) efetivamente revela a extensão do custo adicionado quando alguns nós são removidos. Além disso, analisaremos a fração crítica de vértices removidos f por disfuncionar toda a rede sob ataque aleatório (RA) e ataque ao alvo (TA). Neste estudo foi definido que a rede estava em colapso ou disfuncional se mais de 90% dos pares Origem-Destino estiverem desconectados. (Wu et al., 2018)

5.

ESTUDO DE CASO

5.1. VISÃO GERAL

Neste capítulo, serão apresentadas as análises e resultados das simulações dos parâmetros discutidos no capítulo 4, referentes à verificação de uma rede de metrô. Na revisão da literatura, foram abordadas questões relacionadas ao planejamento e desenvolvimento das cidades de Londres e Tóquio. Além disso, foram analisados artigos científicos que tratam das redes de metrô nessas localidades, bem como do sistema de metrô em outras cidades relevantes, como Nova Iorque e Paris.

Para esse propósito, foram selecionados os estudos de Wu et al (2018), previamente discutidos no capítulo 4, que analisam os sistemas de metrô de Pequim, Londres, Paris, Hong Kong, Tóquio e Nova Iorque. As análises apresentadas nesse artigo científico são de extrema importância e relevância para a dissertação de mestrado em questão.

A tabela 02 abaixo traz os dados básicos dos sistemas utilizados para as análises mencionadas.

Tabela 2 - Dados básicos da escala do sistema metropolitano (a partir de 2016).

Fonte: (Wu et al., 2018)

Cidade	Número de estações	Número de linhas
Pequim	285	17
Londres	361	13
Paris	293	15
Hong Kong	86	10
Tóquio	207	13
Nova Iorque	365	23

5.2. AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA TOPOLÓGICA

Primeiro foi simulado cada sistema de metrô para conduzir uma busca exaustiva de todos os caminhos entre quaisquer dois nós. Sendo realizado simulações para 100 realizações de roteamento da lógica intuitiva do passageiro (PIL), sendo que o comprimento médio do caminho e contagem média de transferências estão na tabela 3. Com isso, foi concluído que o metrô de Tóquio tem o comprimento médio mínimo do caminho e contagem média mais baixa de transferências. Na figura abaixo, podemos observar que o comprimento do caminho segue uma distribuição gaussiana. (Wu et al., 2018)

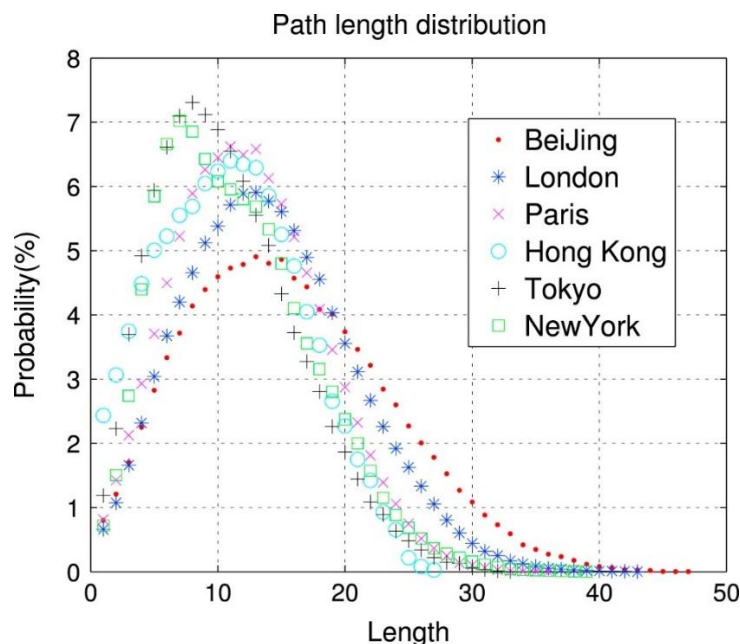


Fig. 14 - Distribuição do comprimento do caminho.

Fonte: (Wu et al., 2018)

Em relação aos valores da eficiência topológica metropolitana (MTE), são baseados em arestas ponderadas e roteamento PIL, que estão listados na Tabela 4, os valores de MTE para as redes metropolitanas em estudo. Como esperado, esses sistemas metroviários possuem eficiência topológica abaixo de 1, ou seja, menos eficientes que a rede totalmente conectada. Isto porque o número de arestas existentes para cada rede é muito menor do que o número máximo teórico. Usando o MTE, podemos comparar as eficiências topológicas de diferentes sistemas de metrô, identificando assim a estrutura topológica que melhor suportaria o fluxo de tráfego na rede. Nesse aspecto, o sistema de metrô de Nova York é considerado topologicamente mais eficiente do que os demais. (Wu et al., 2018)

Tabela 3 - Estatísticas e ajuste de parâmetros de distribuição.

Fonte: (Wu et al., 2018)

Cidade	Comprimento médio do caminho	Contagem média de transferências	a	b	c
Pequim	15,60	1,68	4.881	14.22	12.17
Londres	14.11	1,89	5.903	13.24	9.825
Paris	12h45	1,85	6.736	11.84	8.652
Hong Kong	11.03	1,77	6.496	10.34	9.486
Tóquio	10.74	1.62	7.121	9.514	8.313
Nova Iorque	11.56	2.59	6.642	10.17	8.934

Tabela 4 - Eficiência topológica metropolitana (MTE) de redes metropolitanas.

Fonte: (Wu et al., 2018)

Cidade	Pequim	Londres	Paris	Hong Kong	Tóquio	Nova Iorque
MTE	0,0976	0,1175	0,1177	0,1519	0,1490	0,1906

5.3. AVALIAÇÃO DA ROBUSTEZ

Para avaliar a robustez das redes, eles removeram os vértices da rede, 1 - aleatoriamente; 2 - em ordem decrescente da probabilidade de ocupação do nó (NOP); 3 - em ordem decrescente de intermediação. Nas figuras 15 a 18 temos a taxa de rota desabilitada (DRR) e o ajuste de custo (CA) versus o número de ataques sob ataque aleatório (RA) e ataque ao alvo (TA). Na tabela 4 eles listaram a fração crítica de remoção em todos os três métodos de ataque. Sendo observado que em todos os casos, a taxa de rota desabilitada (DRR) aumenta com o número de nós removidos (atacados) rapidamente no início e satura antes do colapso da rede. Ademais, observaram que existe um ponto crítico de remoção na qual o ajuste de custo (CA) atinge seu valor máximo; também observaram que as redes metropolitanas são mais robustas sob ataque aleatório (RA), e que ataque ao alvo (TA) baseado na ordem decrescente da probabilidade de ocupação do nó (NOP) que pode interromper a rede metropolitana mais rapidamente do que ataque ao alvo (TA), baseado em ordem decrescente de intermediação. (Wu et al., 2018)

Por fim, concluem que a rede metropolitana de Tóquio é robusta sob ataque aleatório (RA). Contudo o metrô de Hong Kong é mais robusto contra-ataque ao alvo (TA) do que os demais.

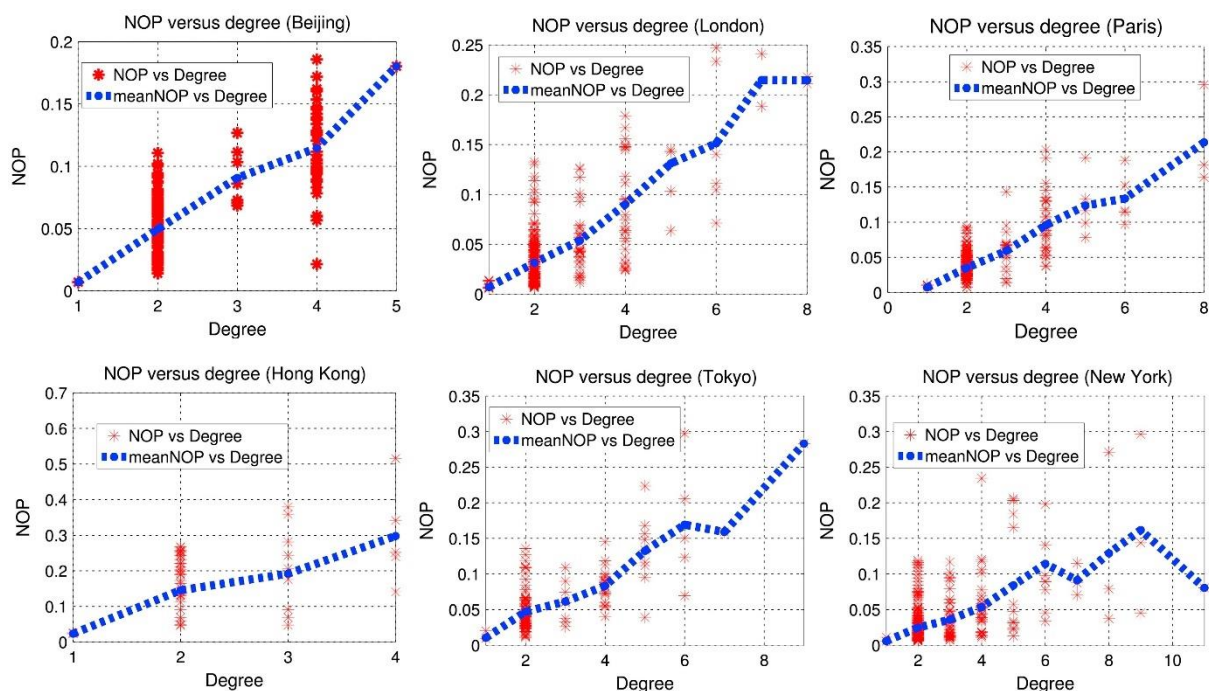


Fig. 15 - Probabilidade de ocupação do nó (NOP) versus grau do nó.

Fonte: (Wu et al., 2018)

Tabela 5 - Número crítico N_c e fração f de nós removidos (levando a 90% dos pares OD desconectados) sob ataque aleatório (RA) e ataque ao alvo (TA).

Fonte: (Wu et al., 2018)

Cidade	Pequim		Londres		Paris		Hong Kong		Tóquio		Nova Iorque	
	N_c	f	N_c	f	N_c	f	N_c	f	N_c	f	N_c	f
RA	63	22,11%	78	21,61%	74	25,26%	25	29,08%	66	31,88%	105	28,77%
AT baseado em NOP	20	7,02%	25	6,93%	19	6,48%	16	18,60%	16	7,73%	42	11,51%
AT baseado em intermediação	22	7,72%	25	6,93%	20	6,83%	18	20,93%	18	8,0%	48	13,15%

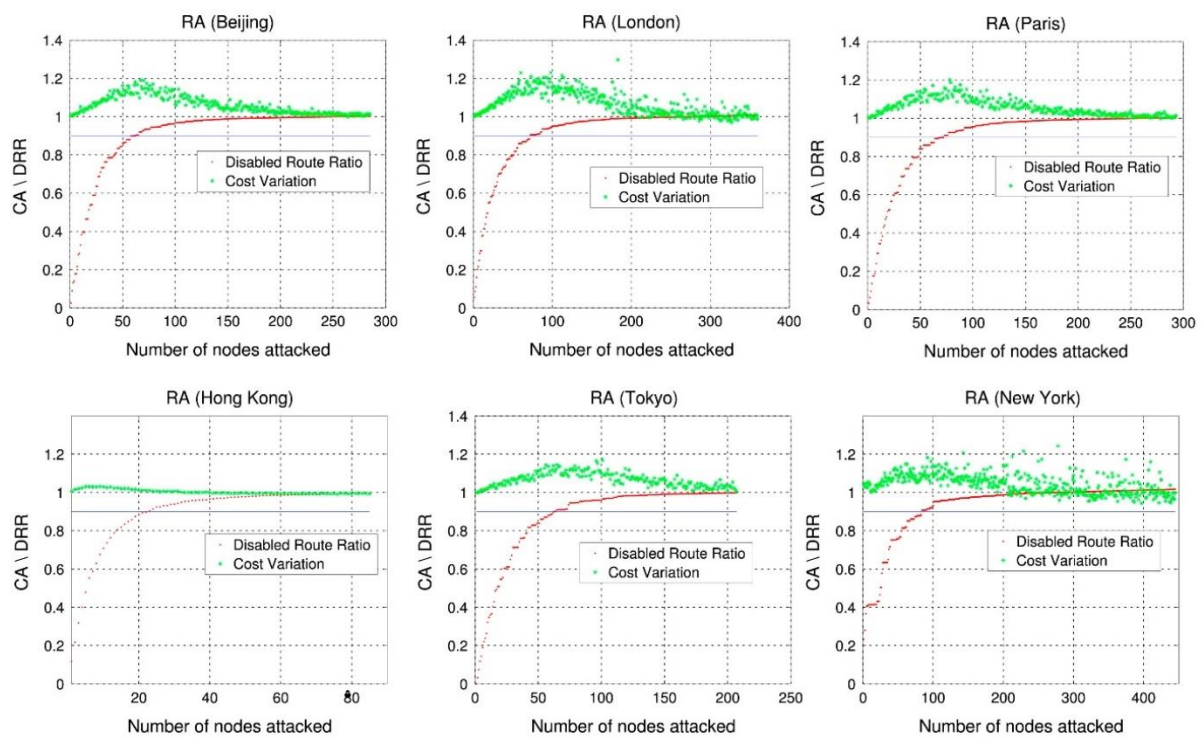


Fig. 16 - DRR e CA versus número de nós sob ataque aleatório (RA).

Fonte: (Wu et al., 2018)

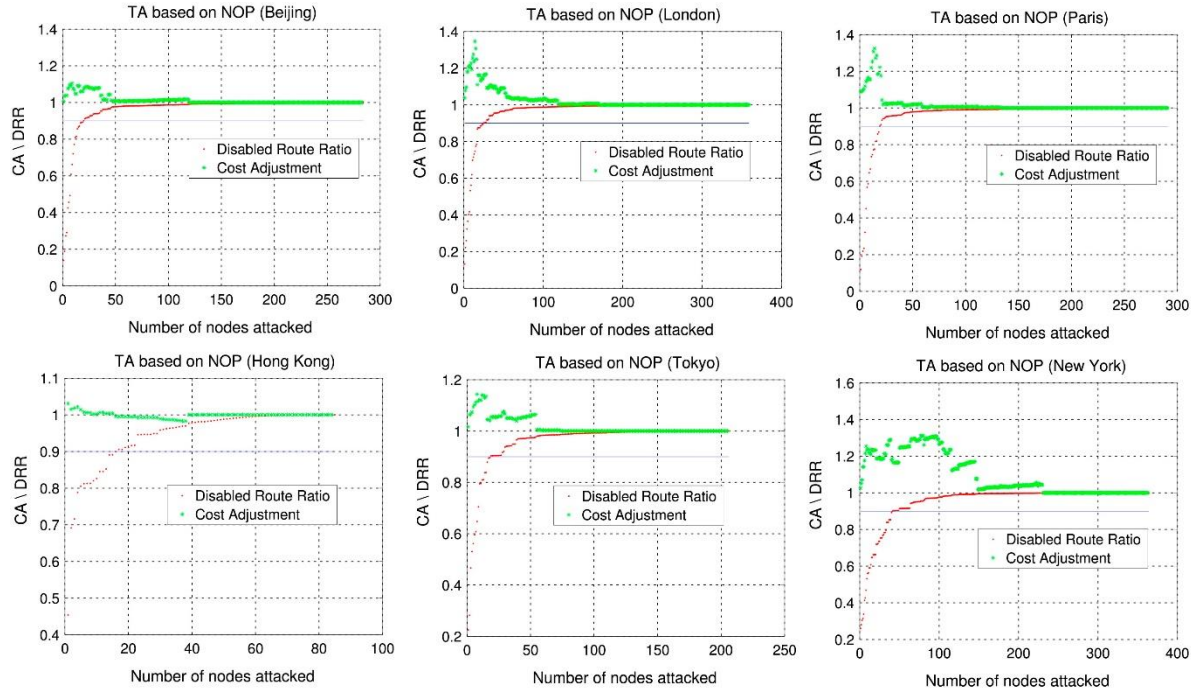


Fig. 17 - DRR e CA versus número de nós sob ataque de alvo (TA) de acordo com a ordem descendente de NOP.

Fonte: (Wu et al., 2018)

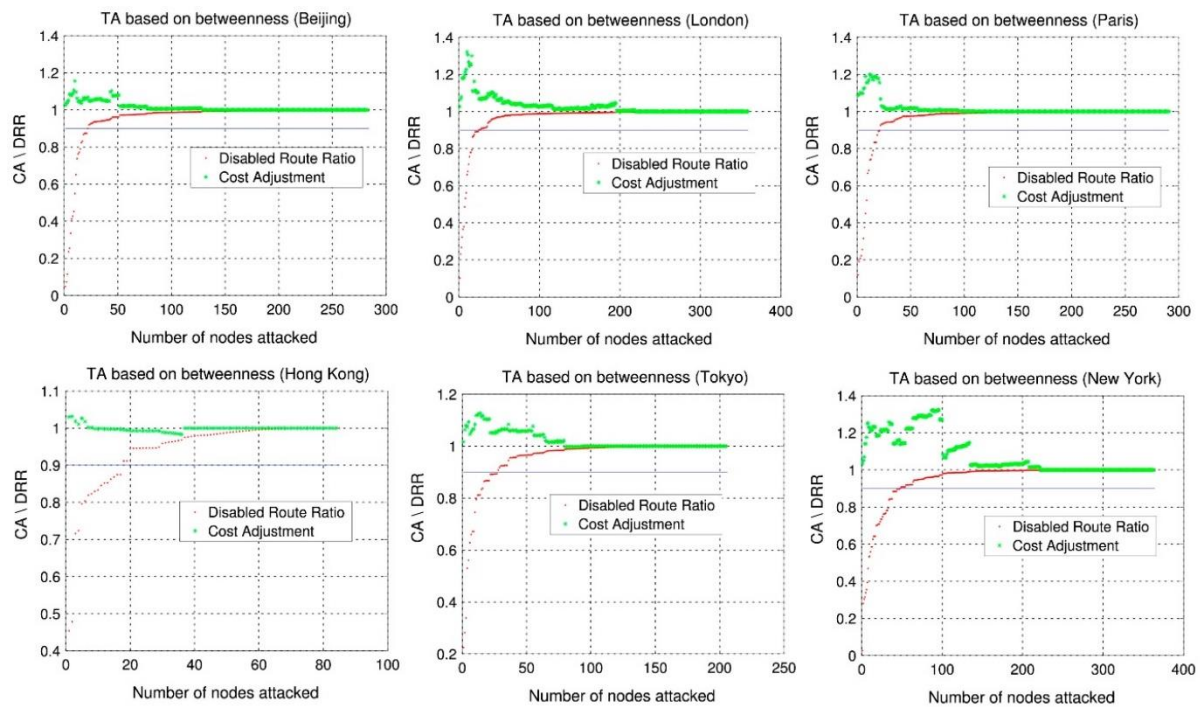


Fig. 18 - DRR e CA versus número de nós sob ataque ao alvo de acordo com a ordem de intermediação descendente.

Fonte: (Wu et al., 2018)

Com isso, Wu et al (2018), concluem que a escolha da medida apropriada para a avaliação de redes metropolitanas é crucial para a avaliação da robustez de um sistema de metrô em rede. Ademais, afirmam que a probabilidade de ocupação do nó (NOP) é considerado mais prático e altamente indicativo da importância de uma estação de metrô. Sendo que avaliar a robustez contra a remoção de nós, probabilidade de ocupação do nó (NOP) mais altos refletiria mais verdadeiramente a capacidade do sistema em manter seu desempenho diante de eventualidades. (Wu et al., 2018)

Posto isso, concluíram que através um algoritmo realista de roteamento de passageiros, o conceito de eficiência de rede é redefinido para melhor consistência com os sistemas de metrô. Sendo que uma nova medida de centralidade do nó baseada na utilização do nó é proposta para avaliar a centralidade do nó. A partir disso, esta nova medida de centralidade fornece uma avaliação mais realista da centralidade. A robustez da rede metropolitana foi estudada sob ataque aleatório e ataque ao alvo e, o desempenho da rede sob ataque é avaliado em termos de taxa de rota desabilitada e ajuste de custo. (Wu et al., 2018)

Como resultado, foi verificado que a rede metropolitana de Nova York tem melhor eficiência topológica, as redes metropolitanas de Tóquio e Hong Kong são mais robustas sob ataques aleatórios e direcionados, respectivamente. (Wu et al., 2018)

Por fim, Wu et al (2018) enfatiza, que o método proposto neste artigo pode ser usado para fornecer uma base analítica útil para planejar e projetar redes metropolitanas. No caso de redes metropolitanas desenvolvidas, o conceito de probabilidade de ocupação de nó é útil para avaliar a importância relativa das estações, bem como a vulnerabilidade da rede sob possível ataque. Porque na busca de para encontrar uma melhor estrutura para as redes metropolitanas requer a consideração de vários fatores operacionais, incluindo demandas dinâmicas de carga, tempo de congestionamento no trem, tempo de transferência e alocação de recursos, como frequência de partida do trem e capacidade de carga. (Wu et al., 2018)

6.

CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no que foi exposto, é entendido que o metrô aumenta a conectividade espacial urbana, e uma rede espacial urbana que funciona em rede e altamente conectada fornece melhores recursos sociais e promoção da qualidade de vida das pessoas.

Desta forma, nos planeadores devemos olhar para o crescimento da cidade de forma diferente, que ela cresce e desenvolve como um *semilattice*, além disso as cidades atuais são cidades distribuídas, com vários polis centros.

Diante disso, para entender o movimento pendular das pessoas, podemos utilizar recursos tecnológicos de dados móveis através de telemóveis, na qual faremos uma pesquisa de Origem-Destino mais científica e precisa.

Posto isso, conforme relatado no capítulo 4, temos vários mecanismos e métodos científicos para analisar a eficiência de uma rede de metrô, bem como a utilização e escolhas de trajetos por passageiros. Pois cada sistema de metrô é único em sua própria maneira, refletindo as características e necessidades específicas de sua cidade, seja por sua pequena extensão, ou por abranger grandes áreas metropolitanas, enquanto outros se destacam por sua arquitetura icônica e design inovador.

Portanto, desde a inauguração do primeiro sistema de metrô em Londres, em 1863, muitas inovações e avanços têm ocorrido nessa forma de transporte, sendo certo que os diversos sistemas de metrô ao redor do mundo têm sua própria história, desde os mais antigos e tradicionais até os mais modernos e futuristas, que contribuíram para a evolução do transporte urbano e o desenvolvimento das cidades.

De acordo com Cervero et al (2009), o desenvolvimento de tecnologias como a eletrificação, o uso de sistemas de sinalização avançados e a adoção de trens mais rápidos e confortáveis têm sido fundamentais para a melhoria da experiência dos usuários e a eficiência dos sistemas de metrô.

Com isso, podemos destacar um fator importante que é a aplicação da Lei de Lindy ao sistema de metrô em rede, pois nos fornece uma perspectiva valiosa sobre sua importância e sustentabilidade a longo prazo. Através da análise da longevidade e da relevância contínua desses sistemas, podemos compreender como eles se tornaram pilares do transporte urbano em diversas cidades ao redor do mundo.

A teoria da Lei de Lindy postula que a expectativa de vida de certos objetos não perecíveis é proporcional à sua idade atual. Em outras palavras, a teoria afirma que, para um objeto não perecível, cada dia adicional de sobrevivência aumenta a expectativa de vida futura em um dia. Essa ideia tem aplicação em várias áreas, como literatura, tecnologia, ideias e até mesmo instituições.

Os sistemas de metrô existem há décadas em várias cidades ao redor do mundo. Eles têm resistido ao teste do tempo, demonstrando sua utilidade e valor para a sociedade. Esses sistemas fornecem uma infraestrutura confiável e eficiente para o transporte urbano em grande escala, atendendo às necessidades de milhões de pessoas diariamente. Além disso, o sistema de metrô em rede se encaixa na categoria de objetos não perecíveis, de acordo com a Lei de Lindy.

Enquanto muitos outros meios de transporte podem enfrentar desafios e mudanças com o passar do tempo, o metrô continua sendo uma opção vital e resiliente. A sua presença física, com linhas e estações interligadas, proporciona uma conectividade duradoura e confiável para os passageiros. Ao considerar a eficiência e a capacidade de transporte em massa, os sistemas de metrô em rede têm se mostrado superiores em comparação a outras opções de transporte. Eles são capazes de lidar com grandes volumes de passageiros, reduzindo congestionamentos nas ruas e oferecendo uma alternativa mais sustentável e econômica em comparação aos veículos individuais.

Posto isto, e conforme afirma Lin (2010), o metrô é reconhecido como uma solução eficaz para o transporte urbano, pois muitas cidades adotaram o metrô como uma infraestrutura urbana estratégica

Portanto, o sistema de metrô em rede também sugere que, à medida que esses sistemas continuam a existir e a ser utilizados, eles se tornam cada vez mais integrados à infraestrutura urbana e à vida das pessoas. Isso fortalece sua relevância e aumenta sua probabilidade de continuar a desempenhar um papel fundamental no transporte urbano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexander, C. (1965). A city is not a tree. *Ekistics*, 139, 344-348.
- Almeida, J. R. d. (2018). Planejamento urbano. *Paisagem e Ambiente*, 0(41), 187-210. <https://doi.org/10.11606/issn.2359-5361.v0i41p187-210>
- Angeloudis, P., & Fisk, D. (2006). Large subway systems as complex networks. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications*, 367, 553-558. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.11.007>
- Banister, D., & Stead, D. (2004). Impact of information and communications technology on transport. *Transport Reviews*, 24(5), 611-632. <https://doi.org/10.1080/0144164042000206060>
- Barabasi, A. L., & Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *science*, 286(5439), 509-512. <https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509>
- Berge, C. (2001). *The theory of graphs*. Courier Corporation.
- Bishop, P., Hines, A., & Collins, T. (2007). The current state of scenario development: an overview of techniques. *foresight*, 9(1), 5-25.
- Bovaird, T., & Loeffler, E. (2012). From Engagement to Co-production: The Contribution of Users and Communities to Outcomes and Public Value. *Voluntas*, 23(4), 1119-1138. <https://doi.org/10.1007/s11266-012-9309-6>
- Cao, H., Zhao, F., Liu, H., & Yu, T. (2016). The impact of subway on urban traffic network based on complex network theory. *MATEC Web of Conferences*,
- Carmona, M., de Magalhães, C., & Hammond, L. (2021). Public Space: The Management Dimension. In *Public Space Reader* (pp. 264-271). Routledge.
- Cervero, R., & Kockelman, K. (1997). Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transportation Research Part D-Transport and Environment*, 2(3), 199-219. [https://doi.org/Doi10.1016/S1361-9209\(97\)00009-6](https://doi.org/Doi10.1016/S1361-9209(97)00009-6)
- Chen, S., Claramunt, C., & Ray, C. (2014). A spatio-temporal modelling approach for the study of the connectivity and accessibility of the Guangzhou metropolitan network. *Journal of Transport Geography*, 36, 12-23. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.02.006>
- Chen, S. P., Claramunt, C., & Ray, C. (2014). A spatio-temporal modelling approach for the study of the connectivity and accessibility of the Guangzhou metropolitan network. *Journal of Transport Geography*, 36, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.02.006>
- Cui, A. (2006). *Bus passenger origin-destination matrix estimation using automated data collection systems* Massachusetts Institute of Technology].
- Denney, A. S., & Tewksbury, R. (2013). How to write a literature review. *Journal of criminal justice education*, 24(2), 218-234.
- Derrible, S., & Kennedy, C. (2010). The complexity and robustness of metrô networks. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications*, 389(17), 3678-3691. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.04.008>
- Garbutt, P. (1989). World metrô systems.
- Garrison, W., & Marble, D. (1961). The structure of transportation networks. Evanston, Ill.: Transportation Center at Northwestern University. Draft of a report submitted October 31, 1961 to US Army Transportation Research Command, Fort Eustis, Virginia, by the Transportation Center at Northwestern University under contract DA-44-177-TC-685. *Transportation geography study*.
- Garrison, W. L., & Marble, D. F. (1962). *The structure of transportation networks*.
- Gibbons, S., & Machin, S. (2005). Valuing rail access using transport innovations. *Journal of Urban Economics*, 57(1), 148-169. <https://doi.org/10.1016/j.jue.2004.10.002>
- Huang, R. H. (2020). Transit-based job accessibility and urban spatial structure. *Journal of Transport Geography*, 86, 102748. <https://doi.org/ARTN10274810.1016/j.jtrangeo.2020.102748>
- Jittrapirom, P., Caiati, V., Feneri, A. M., Ebrahimigharehbaghi, S., Alonso-Gonzalez, M. J., & Narayan,

- J. (2017). Mobility as a Service: A Critical Review of Definitions, Assessments of Schemes, and Key Challenges [business model; innovative mobility services; integrated mobility; modelling]. *Urban Planning*, 2(2), 13-25. <https://doi.org/10.17645/up.v2i2.931>
- Jun, M. J. (2020). The effects of polycentric evolution on commute times in a polycentric compact city: A case of the Seoul Metropolitan Area. *Cities*, 98, 102587. <https://doi.org/ARTN 102587>
10.1016/j.cities.2019.102587
- Kansky, K. J. (1963). *Structure of transportation networks: relationships between network geometry and regional characteristics*. The University of Chicago.
- Korthals Altes, W. K. (2002). Local government and the decentralisation of urban regeneration policies in the Netherlands. *Urban studies*, 39(8), 1439-1452.
- Lam, T. N., & Schuler, H. J. (1982). Connectivity index for systemwide transit route and schedule performance. *Transportation Research Record*(854).
- Latora, V., & Marchiori, M. (2002). Is the Boston subway a small-world network? *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 314(1-4), 109-113. [https://doi.org/10.1016/s0378-4371\(02\)01089-0](https://doi.org/10.1016/s0378-4371(02)01089-0)
- Li, Z. (2016). The study on complexity properties in the development of urban rail transit network.
- Lin, D., Nelson, J. D., Beecroft, M., & Cui, J. Q. (2021). An overview of recent developments in China's metrô systems. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 111, 103783. <https://doi.org/ARTN 103783>
10.1016/j.tust.2020.103783
- Mohammed, M., & Oke, J. (2023). Origin-destination inference in public transportation systems: A comprehensive review. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 12(1), 315-328. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.03.002>
- Morlok Jr, E. K. (1967). *An analysis of transport technology and network structure*. Northwestern University.
- Musso, A., & Vuchic, V. R. (1988). *Characteristics of metrô networks and methodology for their evaluation*. National Research Council, Transportation Research Board Washington, DC, USA.
- Nations, U. (2018). *2018 Revision of World Urbanization Prospects*. Wednesday, May 16, 2018 Retrieved from <https://www.un.org/pt/desa/2018-revision-world-urbanization-prospects>
- Newman, M. E. (2002). Assortative mixing in networks. *Phys Rev Lett*, 89(20), 208701. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.208701>
- Newman, M. E. (2003). Mixing patterns in networks. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, 67(2 Pt 2), 026126. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.67.026126>
- Peng, J. D., Cui, C. W., Qi, J. J., Ruan, Z. H., Dai, Q., & Yang, H. (2021). The Evolvment of Rail Transit Network Structure and Impact on Travel Characteristics: A Case Study of Wuhan. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(11), 789. <https://doi.org/ARTN 789>
10.3390/ijgi10110789
- Pogonyi, C. G., Graham, D. J., & Carbo, J. M. (2021). Metrôs, agglomeration and displacement. Evidence from London. *Regional Science and Urban Economics*, 90, 103681. <https://doi.org/ARTN 103681>
10.1016/j.regsciurbeco.2021.103681
- Price, C. (1970). The Cedric Price Column. *Archigram*, 9.
- Price, C., & Littlewood, J. (1967). Fun Palace, Camden, London. *Architectural Design*, 37, 522-525.
- Price, R. D. (1972). Building Industry - Investigation of Economic History from Fourteenth to Nineteenth Centuries .1. Rural and Urban Houses in Traditional France - French - Bardet, Jp. *Journal of European Studies*, 2(3), 322-322. <Go to ISI>://WOS:A1972YY85500059
- Quintella, I. (2015). Árvore x Semilattice: Estratégias de concepção da forma urbana na escola francesa de urbanismo e no modernismo funcionalista. <http://projedata.grupoprojetar.ct.ufrn.br/dspace/bitstream/handle/123456789/960/Comu17.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Song, J., Abuduwayiti, A., & Gou, Z. (2023). The role of subway network in urban spatial structure optimization – Wuhan city as an example. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 131, 104842. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104842>

- Spickermann, A., Grienitz, V., & von der Gracht, H. A. (2014). Heading towards a multimodal city of the future? *Technological Forecasting and Social Change*, 89, 201-221. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.08.036>
- Vanessa Cristina Fernandes, D. (2018). *Projecto Urbano e mobilidade na cidade contemporânea. Uma proposta para requalificar o espaço urbano da zona envolvente à estação ferroviária de Pombal* (Publication Number Dissertation/Thesis) <https://go.exlibris.link/MMtwlWp8>
- Vasanen, A. (2012). Functional Polycentricity: Examining Metrôpolitan Spatial Structure through the Connectivity of Urban Sub-centres. *Urban studies*, 49(16), 3627-3644. <https://doi.org/10.1177/0042098012447000>
- Vassão, C. A. (2008). *Arquitetura livre: complexidade, metadesign e ciência nômade* [Universidade de São Paulo].
- Vuchic, V. R. (2017). *Urban transit: operations, planning, and economics*. John Wiley & Sons.
- Vuchic, V. R., & Musso, A. (1991). Theory and practice of metrô network design. *Public transport international*, 3, 298.
- Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *Nature*, 393(6684), 440-442. <https://doi.org/10.1038/30918>
- Wee, B. V., & Banister, D. (2016). How to write a literature review paper? *Transport Reviews*, 36(2), 278-288.
- Wei, L., Luo, Y., Wang, M., Cai, Y. Y., Su, S. L., Li, B. Z., & Ji, H. Y. (2020). Multiscale identification of urban functional polycentricity for planning implications: An integrated approach using geo-big transport data and complex network modeling. *Habitat International*, 97, 102134. <https://doi.org/ARTN> 102134
- 10.1016/j.habitatint.2020.102134
- Wong, K. I., Wong, S. C., Tong, C. O., Lam, W. H. K., Lo, H. K., Yang, H., & Lo, H. P. (2005). Estimation of origin-destination matrices for a multimodal public transit network. *Journal of advanced transportation*, 39(2), 139-168. <Go to ISI>://WOS:000231076300002
- Wu, X. T., Dong, H. R., Tse, C. K., Ho, I. W. H., & Lau, F. C. M. (2018). Analysis of metrô network performance from a complex network perspective. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications*, 492, 553-563. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2017.08.074>
- Xiaohui, L., Chen, J., & Yang, J. (2016). Impact of rail transit on urban spatial structure in Shenzhen: Analysis based on land parcel price and FAR gradients. *Geographical research*, 11, 2091-2104.
- Yang, Z. J., & Chen, X. L. (2018). Evolution assessment of Shanghai Urban Rail Transit Network. *Physica a-Statistical Mechanics and Its Applications*, 503, 1263-1274. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2018.08.099>
- Yu, X., Chen, Z., Liu, F., & Zhu, H. (2023). How urban metrô networks grow: From a complex network perspective [Article]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 131, 13, Article 104841. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104841>
- Zannat, K. E., & Choudhury, C. F. (2019). Emerging Big Data Sources for Public Transport Planning: A Systematic Review on Current State of Art and Future Research Directions. *Journal of the Indian Institute of Science*, 99(4), 601-619. <https://doi.org/DOI> 10.1007/s41745-019-00125-9
- Zhou, J., & Yang, Y. (2021). Transit-based accessibility and urban development: An exploratory study of Shenzhen based on big and/or open data. *Cities*, 110, 102990.

ANEXOS

Tabela 6 - Propriedades de rede de sistemas de metrô.

Fonte: (Derrible & Kennedy, 2010)

Rede	Indicadores Básicos										Atributo de Linha L						Características				
	Linhas	Vértices			Arestas diatônicas			Max. número de transferência	Registro do total de vértices	Hospedagem x número de linhas						Fator de Escala	Coeficiente de Agrupamento	Indicador de Robustez	Taxa transp/ o total vértice		
		Total	Monotônico	Diatônico			Total			Single	Multiple	1	2	3	4					5	6
				Total	End	Transfer															
	n_L	V	V_m	V_d	V^e	V^t	D	D^S	D^m	δ	$\ln V $	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	ϵ	γ	r^f	$ V^t / V $
Toronto	4	69	64	10	5	5	11	10	1	3	4.23	64	5	0	0	0	0	3.68	0.46	0.0145	0.0725
Montreal	4	68	64	10	6	4	11	11	0	2	4.22	64	3	1	0	0	0	3.85	0.46	0.0294	0.0588
Chicago	8	151	138	24	11	13	47	29	18	3	5.02	138	5	4	2	1	1	2.66*	0.71	0.0397	0.0861
Boston	5	117	104	29	16	13	32	31	1	3	4.76	104	10	3	0	0	0	3.24	0.40	0.0256	0.1111
Nova Iorque	9	422	375	73	26	47	130	109	21	3	6.05	375	33	7	5	2	0	3.21	0.61	0.0877	0.1114
Washington DC	5	86	78	17	9	8	25	19	6	1	4.45	78	4	3	1	0	0	3.01	0.56	0.0349	0.0930
Cidade do México	11	151	128	35	12	23	47	47	0	2	5.02	128	15	7	1	0	0	3.26	0.47	0.0861	0.1523
Buenos Aires	5	63	59	12	8	4	13	13	0	2	4.14	59	2	2	0	0	0	3.27	0.43	0.0317	0.0635
Londres	13	306	250	83	27	56	155	125	30	2	5.72	250	36	13	5	1	1	3.20**	0.64	0.1405	0.1830
Bruxelas	3	59	55	9	5	4	11	9	2	1	4.08	55	3	1	0	0	0	3.71	0.52	0.0169	0.0678
Paris	14	297	243	77	23	54	137	126	11	3	5.69	243	37	11	3	2	0	3.07	0.61	0.1684	0.1818
Lyon	4	39	35	10	6	4	10	10	0	3	3.66	35	4	0	0	0	0	3.13	0.42	0.0256	0.1026
Marseille	2	24	22	6	4	2	6	6	0	1	3.18	22	2	0	0	0	0	3.46	0.50	0.0417	0.0833
Madrid	13	190	154	46	10	36	82	81	1	3	5.25	154	27	8	1	0	0	3.42*	0.62	0.1895	0.1895
Barcelona	9	123	105	29	11	18	44	42	2	3	4.81	105	14	2	2	0	0	3.08	0.54	0.1138	0.1463
Lisboa	4	44	40	11	7	4	11	11	0	2	3.78	40	4	0	0	0	0	3.32	0.41	0.0227	0.0909
Milão	3	87	81	14	8	6	15	15	0	1	4.47	81	6	0	0	0	0	3.75	0.42	0.0230	0.0690
Roma	2	47	46	5	4	1	4	4	0	1	3.85	46	1	0	0	0	0	5.52	0.44	0.0000	0.0213
Atenas	3	44	40	9	5	4	10	10	0	1	3.78	40	4	0	0	0	0	3.32	0.48	0.0455	0.0909
Cairo	2	53	51	6	4	2	6	6	0	1	3.97	51	2	0	0	0	0	4.67	0.50	0.0189	0.0377
Berlin	9	170	152	32	14	18	45	43	2	3	5.14	152	15	2	1	0	0	3.74	0.50	0.0706	0.1059
Estocolmo	3	100	91	20	11	9	22	20	2	1	4.61	91	8	1	0	0	0	4.04	0.41	0.0100	0.0900
Praga	3	54	51	9	6	3	9	9	0	1	3.99	51	3	0	0	0	0	4.09	0.43	0.0185	0.0556
Bucareste	4	45	39	11	5	6	13	12	1	2	3.81	39	6	0	0	0	0	2.70	0.48	0.0444	0.1333
Moscovo	12	173	145	42	14	28	67	65	2	2	5.15	145	20	7	1	0	0	3.38	0.56	0.1387	0.1618
São Petersburgo	4	54	48	13	7	6	15	15	0	1	3.99	48	6	0	0	0	0	3.00	0.45	0.0556	0.1111
Délihi	3	59	57	8	6	2	7	7	0	2	4.08	57	2	0	0	0	0	4.83	0.39	0.0000	0.0339
Xanguai	8	162	150	22	10	12	32	29	3	3	5.09	150	7	5	0	0	0	3.24**	0.53	0.0494	0.0741
Tóquio	13	202	157	61	16	45	119	111	8	2	5.31	157	31	9	3	2	0	2.80*	0.67	0.2525	0.2228
Osaka	8	121	97	36	12	24	53	53	0	3	4.80	97	22	2	0	0	0	3.38*	0.52	0.1488	0.1983
Seoul	11	286	232	71	17	54	135	134	1	3	5.66	232	50	4	0	0	0	3.54*	0.65	0.2238	0.1888
Hong-Kong	7	53	43	17	7	10	20	18	2	3	3.97	43	10	0	0	0	0	2.10	0.44	0.0377	0.1887
Singapura	4	64	58	12	6	6	13	12	1	3	4.16	58	6	0	0	0	0	3.27	0.43	0.0156	0.0938

* Não estatisticamente significativo e descartado.

** Não estatisticamente significativo, mas mantido.

Tabela 7 - Resultados de regressão e indicadores estatísticos para análise sem escala.

Fonte: (Derrible & Kennedy, 2010)

Rede	Fator de escala ε	Coefficiente de multiplicação α	Ajustado R^2	t valores para ε	raiz quadrada média	Graus de liberdade	χ^2 valores	valores de confiança de 95%	Estatisticamente significativo?
Toronto	3,68	4.16							
Montreal	3,85	4.05	0,973	-8,59	0,352	2	0,98	7.81	Sim
Chicago	2.66 *	4.36	0,903	-6,88	0,574	5	50,63	12.60	Não
Boston	3.24	4.62	0,998	-30.16	0,085	2	0,12	7.81	Sim
Cidade de Nova York	3.21	5.81	0,984	-15,79	0,258	4	6.84	11.10	Sim
Washington DC	3.01	4.11	0,92	-5,94	0,528	3	6,89	9.49	Sim
Cidade do México	3.26	4,97	0,934	-6,61	0,514	3	4.22	9.49	Sim
Buenos Aires	3.27	3,78	0,734	-2,55	1.008	2	7.31	7.81	Sim
Londres	3.20 **	5.72	0,967	-12.18	0,39	5	13.03	12.60	Não
Bruxelas	3.71	3,92	0,978	-9,48	0,307	2	0,67	7.81	Sim
Paris	3.07	5.59	0,989	-19.39	0,201	4	3,74	11.10	Sim
Lyon	3.13	3,56							
Marselha	3.46	3.09							
Madri	3.42 *	5.32	0,911	-5,62	0,633	3	17.96	9.49	Não
Barcelona	3.08	4.62	0,939	-6,87	0,468	3	13h30	9.49	Sim
Lisboa	3.32	3,69							
Milão	3,75	4.39							
Roma	5.52	3.83							
Atenas	3.32	3,69							
Cairo	4,67	3,93							
Berlim	3,74	5.08	0,986	-14,72	0,265	3	1.36	9.49	Sim
Estocolmo	4.04	4.61	0,978	-9,49	0,335	2	1.52	7.81	Sim
Praga	4.09	3,93							
Bucareste	2,7	3,66							
Moscou	3.38	5.17	0,937	-6,78	0,519	3	7,8	9.49	Sim
São Petersburgo	3	3,87							
Délhi	4,83	4.04							
Xangai	3.24 *	4,79	0,843	-3,43	0,742	2	10.67	7.81	Não
Tóquio	2,8	5.17	0,989	-19,25	0,185	4	3,56	11.10	Sim
Osaka	3.38 *	4.81	0,842	-3,41	0,779	2	14.57	7.81	Não
Seul	3.54 *	5.69	0,836	-3,35	0,829	3	38.22	9.49	Não
Hong Kong	2.10	3,76							
Cingapura	3.27	4.06							

* Não estatisticamente significativo e descartado.

** Não estatisticamente significativo, mas mantido.