



ANÁLISE DOS IMPACTOS DA DEMANDA SOBRE OS TEMPOS DE VIAGENS
EM SERVIÇOS DE TRANSPORTE METROFERROVIÁRIO: UMA APLICAÇÃO
AO CASO DO METRÔ DO RIO DE JANEIRO.

Rafael Abreu Viana

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Matheus Henrique de Sousa Oliveira

Rio de Janeiro
Dezembro de 2022

ANÁLISE DOS IMPACTOS DA DEMANDA SOBRE OS TEMPOS DE VIAGENS
EM SERVIÇOS DE TRANSPORTE METROFERROVIÁRIO: UMA APLICAÇÃO
AO CASO DO METRÔ DO RIO DE JANEIRO.

Rafael Abreu Viana

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Orientador: Matheus Henrique de Sousa Oliveira

Aprovada por: Prof. Matheus Henrique de Sousa Oliveira

Prof. Hostílio Ratton Xavier Neto

Prof. Carlos Eduardo Sanches de Andrade

RIO DE JANEIRO, RJ BRASIL

DEZEMBRO DE 2022

Viana, Rafael Abreu.

Análise dos Impactos da Demanda Sobre os Tempos de Viagens em Serviços de Transporte Metroferroviário: Uma aplicação ao caso do Metrô do Rio de Janeiro/ Rafael Abreu Viana. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XI, 96 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Matheus Henrique de Sousa Oliveira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 79-87.

1. Transporte público. 2. Atrasos. 3. Desempenho Operacional. I. Oliveira, Matheus Henrique de Sousa. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

“Nada façais por contenda ou por
vanglória, mas por humildade; cada um
considere os outros superiores a si mesmo.

Não atente cada um para o que é
propriamente seu, mas cada qual também
para o que é dos outros.” Filipenses 2:3-4

Agradecimentos

A Deus pelo *Ruach*, por seu pela sua Presença e Companhia em todos os momentos e por todos os dons e oportunidade que me presenteou. Te amo com tudo que sou!

Aos meus pais José e Sheila por todo o investimento, pelas palavras de ânimo e orações. Vocês me ensinaram a amar o conhecimento e a sabedoria e me apresentaram o Seu Criador. Obrigado. Dedico este título a vocês. Amo vocês!

À minha esposa Juliana e meu filho Pedro por me dividirem com este projeto e apoiarem e me animarem sempre. Amo vocês!

Ao meu irmão Alexandre, minha cunhada Luciana e meus sobrinhos Davi e Lorenzo por me animarem por sempre estarmos juntos compartilhando nossos sentimentos e emoções. Amo vocês!

Ao meu orientador Matheus pela paciência e ensinamentos. Trabalhar contigo foi um grande presente! Obrigado por tudo, mestre!

Aos muitos amigos do PET com quem pude dividir momentos de aflição e assim pudemos nos ajudar de maneira mútua. Muito obrigado, meus irmãozinhos!

Às empresas que me apoiaram e estenderam seus braços para mim durante este projeto da minha vida: VLT Carioca, MetrôRio e Goal Systems.

Ao meu maior incentivador para iniciar este projeto, José Carlos Alves, meu querido mestre e amigo. Muito obrigado!

A todos professores e funcionários do PET que sempre estiveram disponíveis para compartilhar do seu tempo e conhecimento para me ajudar. Muito obrigado.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DOS IMPACTOS DA DEMANDA SOBRE OS TEMPOS DE VIAGENS
EM SERVIÇOS DE TRANSPORTE METROFERROVIÁRIO: UMA APLICAÇÃO
AO CASO DO METRÔ DO RIO DE JANEIRO.

Rafael Abreu Viana

Dezembro/2022

Orientadores: Matheus Henrique de Sousa Oliveira

Programa: Engenharia de Transportes

O modo de transporte metroviário é reconhecido pela sua alta capacidade de ofertar lugares em um curto espaço de tempo, sua disponibilidade, regularidade e maior previsibilidade quando comparado com outros modos de transporte e, por isto, está presente nas principais metrópoles globais. Este trabalho contém uma abordagem analítica sobre a relação entre o aumento de passageiros transportados e a regularidade do serviço prestado à população. A regularidade e a pontualidade do sistema metroviário são características importantes para a percepção do nível de serviço ofertado e, por isso, esta dimensão foi a escolhida para este estudo. Este tipo de investigação torna-se ainda mais relevante em ambientes com características de demanda anual crescente e em condições nas quais o volume de tráfego dos veículos é próximo ao valor do volume de tráfego teórico projetado para o sistema. Este trabalho utilizou um modelo de simulação computacional que foi criado em linguagem computacional *Visual Basic for Applications* a partir do estudo bibliográfico do fenômeno de atrasos em sistemas metroviários com o objetivo de analisar se existem evidências científicas que comprovem a relação de causalidade entre o aumento do número de passageiros transportados e a redução do desempenho operacional em um sistema de metrô. Os resultados obtidos mostram que existe uma relação entre o

aumento do número de passageiros transportados e redução dos índices de desempenho operacional medidos pelos atrasos nos tempos de viagem ou pela variabilidade do intervalo de passagem dos veículos nas estações. Espera-se que o uso deste tipo de procedimento possa contribuir para o melhor entendimento da dinâmica entre o aumento da demanda de passageiros e o seu impacto para a gestão da operação diária de um sistema de metrô e, ainda, para orientar a definição de gatilhos de investimentos para manter o nível de serviço em um padrão de qualidade desejado.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ANALYSIS OF DEMAND IMPACTS ON TRAVEL TIMES IN METRO-RAIL
TRANSPORTATION SERVICES: AN APPLICATION TO THE CASE OF THE RIO
DE JANEIRO SUBWAY.

Rafael Abreu Viana

December/2022

Advisor: Matheus Henrique de Sousa Oliveira

Department: Transportation Engineering

The subway transport mode is recognized for its high capacity to offer places in a short period of time, its availability, regularity, and greater predictability when compared to other modes of transportation and, for this reason, it is present in the main global metropolises. This paper contains an analytical approach to the relationship between the increase in passengers transported and the regularity of the service provided to the population. The regularity and punctuality of the subway system are important characteristics for the perception of the level of service offered and, therefore, this dimension was chosen for this study. This type of investigation becomes even more relevant in environments with characteristics of increasing annual demand and in conditions in which the vehicle traffic volume is close to the value of the theoretical traffic volume projected for the system. This work used a computer simulation model that was created in Visual Basic for Applications computer language from the bibliographic study of the phenomenon of delays in subway systems with the objective of analyzing whether there is scientific evidence that proves the causal relationship between the increase in the number of passengers carried and the reduction in operational performance in a subway system. The results obtained show that there is a

relationship between an increase in the number of passengers carried and a reduction in operational performance indices measured by travel time delays or variability in the vehicle passage interval at stations. It is expected that the use of this type of procedure can contribute to a better understanding of the dynamics between the increase in passenger demand and its impact on the management of the daily operation of a subway system, and to guide the definition of investment triggers to maintain the level of service at a desired quality standard.

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1.1 Processo de Crescimento das cidades brasileiras e seus efeitos.....	13
1.1.2 A Região Metropolitana do Rio de Janeiro	14
1.1.3 A importância do transporte metroferroviário.....	15
1.2 O problema e sua relevância.....	18
1.3 Justificativa.....	21
1.4 Objetivos.....	22
1.4.1 Objetivo geral	22
1.4.2 Objetivos específicos.....	22
1.5 Delimitação do tema.....	23
1.6 Roteiro Metodológico.....	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 O Transporte Ferroviário	26
2.1.1 Evolução histórica do conceito do modo de transporte ferroviário.....	26
2.1.2 Conceitos fundamentais do modo ferroviário	27
2.2 Capacidade Ferroviária.....	28
2.2.1.1 Funcionamento dos sistemas de sinalização.....	30
2.3 Planejamento e Controle da Operação.....	34
3 DEMANDA E O IMPACTO DA VARIABILIDADE DOS TEMPOS DE VIAGEM	37
3.1 A importância do controle dos tempos de viagens para a regularidade e pontualidade do sistema.....	37
3.2 Aspectos causadores de desvios nos tempos de viagem.....	40
3.3 Os fatores que afetam a pontualidade dos trens	43
4 DADOS E MÉTODOS.....	47
4.1 Método utilizado.....	47

4.1.1 Procedimento de simulação e sua aplicação no sistema metroferroviário.	47
4.1.2 Características do modelo proposto.....	48
4.1.2.1 Plano operacional teórico	49
4.1.2.2 Disponibilidade dos recursos de infraestrutura e sinalização	51
4.1.2.3 Demanda de passageiros.....	52
4.1.2.4 Matriz Origem x Destino	53
4.1.2.5 Preferências de posição de embarque.....	53
4.1.2.6 Cálculo do tempo mínimo de permanência em plataforma.....	55
4.2 Materiais	59
5 ANÁLISE DE RESULTADOS	60
5.1 Resultados da comparação entre amostras realizadas x amostras simuladas.	62
5.2 Projeção do impacto da variação de demanda sobre os indicadores de desempenho	70
6 CONCLUSÕES	74
6.1 Limitações e recomendações para trabalhos futuros	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

1 INTRODUÇÃO

O transporte público coletivo é uma atividade essencial para as sociedades modernas (HABITAT, 2012). A implantação e a gestão de um sistema de transporte público eficiente é uma das maneiras com as quais os governos promovem um maior bem-estar social. Esse bem-estar é gerado pelo acesso dos cidadãos às oportunidades de desenvolvimento pessoal, profissional e a instalações de saúde, lazer e a cultura (RUBIM; LEITÃO, 2013; SILVEIRA; COCCO, 2013).

Segundo Pontes (2005), o desenvolvimento de políticas públicas para transportes em áreas metropolitanas é um assunto de alta complexidade e grande relevância para a sociedade. Dada sua importância e impactos, o planejamento e a execução de ações voltadas para o desenvolvimento da rede de transportes devem ser realizados considerando os horizontes de planejamento mais longínquos e os mais diversos impactos econômicos, sociais e ambientais (BRAGA, VANDERLEI, CASTILHO, 2006; BRAGA, 2001; RODRIGUES; SOARES, 2006).

À medida que o uso do tecido urbano das cidades se expande, as possibilidades de investimento em infraestrutura se tornam mais restritas e os custos econômicos e sociais dos investimentos se elevam (FAULHABER; NACIF, 2014; RIZZI, 2010). Sendo assim, é importante que o desenvolvimento das cidades seja embasado em diretrizes que estabeleçam uma visão de futuro e o planejamento da rede de transportes deve estar integralmente alinhado com esta visão.

De acordo com a Organização das Nações Unidas (2018) a concentração da população nas áreas urbanas é um fenômeno mundial que se intensificou nas últimas décadas e que continua a ser uma tendência global. Como consequência, a quantidade de megacidades ao redor do mundo tem crescido rapidamente, com destaque para os países em desenvolvimento. Este fato aumenta a complexidade para proporcionar meios que favoreçam uma mobilidade urbana que viabilize uma acessibilidade eficaz nestas regiões, pois, a demanda simultânea por deslocamentos se intensifica muito (LEE; ARTS; VANCLAY, 2021; THONDOO *et al.*, 2020)

Neste contexto, onde ocorre alta demanda por deslocamentos simultâneos, os sistemas de alta capacidade, especialmente o metroviário tem se mostrado um importante elemento de suporte e desenvolvimento das regiões metropolitanas, como pode ser verificado em estudos de Dong *et al.* (2021) e Zhang (2020). Em seus trabalhos, os autores relacionam o papel do transporte metroviário para o desenvolvimento econômico e social de algumas cidades chinesas.

1.1.1 Processo de Crescimento das cidades brasileiras e seus efeitos

De acordo com a Organização das Nações Unidas (2018), o Brasil experimentou uma drástica alteração da relação população residente em áreas rurais e urbanas nas últimas décadas. Na década de 1950, o percentual da população que residia em áreas urbanas era pouco mais de 30%. Cinco décadas após, este percentual mais do que dobrou. Este fato faz com que o Brasil se situe entre os países com maior parcela da população residentes em áreas urbanas em todo o mundo.

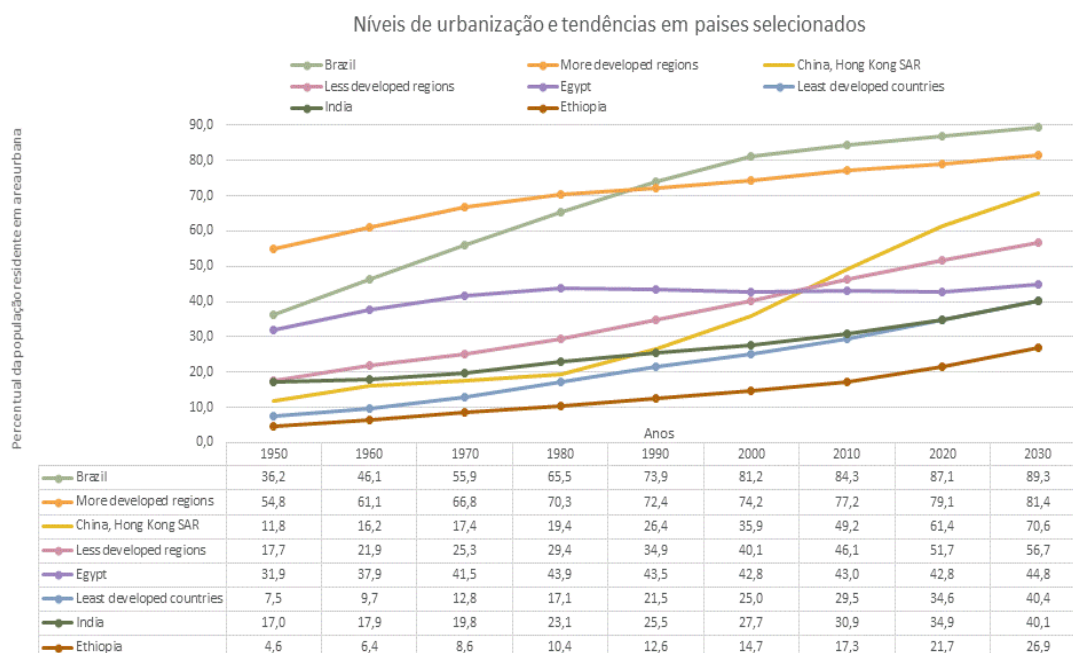


Figura 1- Níveis de urbanização mundial. Fonte: adaptado Nações Unidas (2018).

Para Matos (2014) e Baeninger (2008), as diversas transformações econômicas e sociais que ocorreram no Brasil nas últimas décadas foram os vetores que impulsionaram o

processo de migração urbana e o aumento da concentração demográfica, especialmente no sudeste brasileiro, com destaque para os estados de São Paulo e Rio de Janeiro. Estes fluxos migratórios levam ao surgimento das grandes cidades, um ambiente de maior complexidade para gerir as demandas de serviços públicos (FARD, 2018; MATOS, 2014).

Farias *et al.* (2017) constatou, ainda, que as áreas consideradas urbanas no Brasil representam menos de 1% do território nacional (0,63%) e concentram 160 milhões de pessoas, ou seja, 84,3% da população brasileira. De com a Organização das Nações Unidas (2018), este índice de urbanização é superior às demais regiões e países ao redor do mundo. Este panorama apresenta características de demanda por transporte que estão alinhadas com proposta dos transportes de alta capacidade.

1.1.2 A Região Metropolitana do Rio de Janeiro

Segundo estudo produzido pelo Instituto de Estudos do Trabalho e Sociedade (IETS), a cidade do Rio de Janeiro concentrava em 2014 73,84% do total de empregos de toda a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (IETS, 2016). O segundo município em postos de trabalho formal era Niterói, mas possuía uma representatividade muito inferior, de apenas 5,51% do total.

Estes dados demonstram a dimensão de como o emprego formal está fortemente concentrado na capital, e isso gera desafios de mobilidade local, principalmente nos dias úteis, onde o número de deslocamentos simultâneos convergem para os polos de geração de viagens (PGV) por motivo de emprego.

Mello (2013), em sua tese, afirma que a rede de transporte público instalada na Região Metropolitana do Rio de Janeiro não conseguiu se adaptar de maneira adequada ao longo dos últimos anos para responder às mudanças nas dinâmicas econômicas e sociais locais. Este desequilíbrio impacta diretamente no desempenho operacional destes sistemas.

Muito embora a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) tenha experimentado uma expansão expressiva e tenha ocorrido o surgimento de novas centralidades, o poder público não foi capaz de prover soluções para os problemas de conexão territorial mais complexas especialmente através de sistemas de transporte de alta capacidade (MELLO,2013).

A fragilidade da infraestrutura instalada e o baixo investimento histórico na expansão dos sistemas de transporte de alta capacidade no Estado combinados geram externalidades negativas na mobilidade urbana da RMRJ. Segundo Young e Possas (2013) estas externalidades são traduzidas pelo alto tempo de viagem casa-trabalho enfrentados pelos moradores desta região que em média é de 01h40min, por sentido de circulação.

1.1.3 A importância do transporte metroferroviário

Neste contexto é importante ressaltar o potencial de contribuição dos transportes públicos coletivos de passageiros de alta capacidade nas grandes cidades, como é o caso do Rio de Janeiro. Devido às suas características, este modo de transporte é adequado para regiões de alta concentração populacional, pois é capaz de gerar uma grande quantidade de oferta de lugares em um pequeno espaço de tempo. De acordo com estudo de Amicci (2018), sistemas metroviários que possuem tecnologias avançadas de sinalização podem gerar uma oferta de lugares de 80.000 passageiros/hora/sentido.

No entanto, ao longo dos anos, o transporte público coletivo no Rio de Janeiro privilegiou mais o desenvolvimento pelo modo rodoviário (IPEA, 2011). As razões para tal escolha estão relacionadas aos custos mais baixos de implantação e o investimento em infraestruturas (CNT, 2016; ELISABETE; BELCHIOR, 2018; NILSSON, 1992).

Além disto, a infraestrutura rodoviária pode ser compartilhada por diversos tipos de veículos com diversas finalidades, tais como: transporte coletivo de passageiros, transporte de cargas e transporte individual, atendendo assim vários interesses dentro de um único investimento. Entretanto, para o modo ferroviário, o uso misto da infraestrutura não é observado no Estado. A infraestrutura disponível é utilizada somente pelos operadores concessionados. Outro fato marcante é a separação

majoritária entre a infraestrutura para transporte ferroviário de passageiros e cargas, onde as interferências são pontuais. Atualmente, a interferência ocorre apenas no ramal dos trens de Belford Roxo no trecho entre as estações Costa Barros e Honório Gurgel. Neste trecho também circulam trens da MRS majoritariamente para Pátio do Arará, no porto do Rio de Janeiro.

Os dados do Portal DataRio (2020) mostram que este modo de transporte metroviário experimentou crescimento notável no número de passageiros transportados nas últimas duas décadas, conforme ilustra a Figura 2

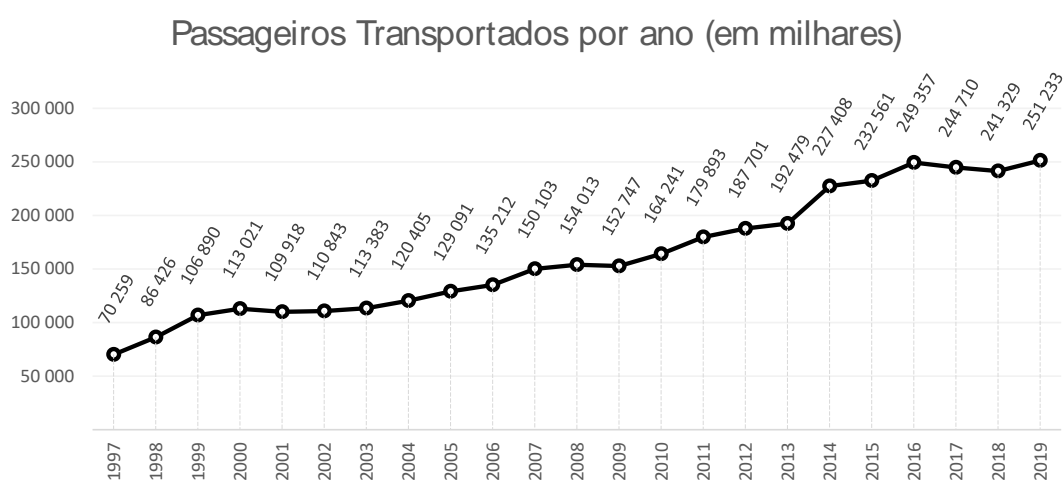


Figura 2 – Evolução do número de passageiros transportados por ano no metrô do Rio de Janeiro desde a concessão. Fonte DataRio (2020)

Entretanto, os investimentos na expansão da infraestrutura metroferroviária não avançaram de forma significativa no mesmo período. A Figura 3 mostra a evolução da extensão da malha metroferroviária após a concessão. Nota-se que o investimento mais recente realizado no sistema de metrô do Rio de Janeiro foi a inauguração da linha 04 que possui aproximadamente 16 km de extensão. Este foi o único projeto de criação de uma nova linha após a concessão do serviço de transporte metroferroviário de passageiros que ocorreu em 1997.

Quando se analisa a expansão das linhas 1 e 2, nota-se que a maior extensão da malha aconteceu no primeiro ano de operação após a concessão (9,8) km, nos 23 anos seguintes a expansão foi de 8 km.

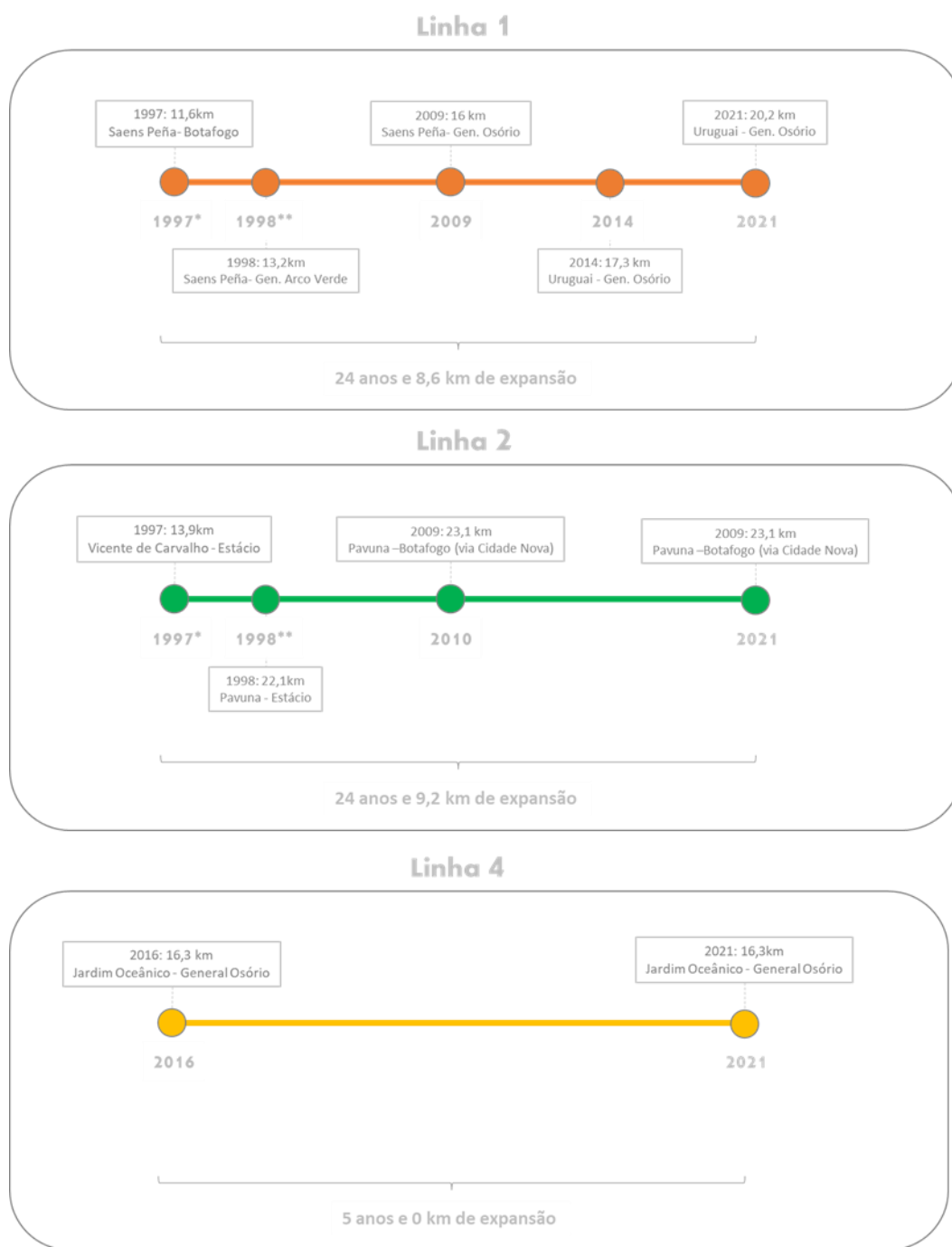


Figura 3 - Expansão da extensão malha metroferroviária do metrô do Rio de Janeiro,

Fonte: Elaboração própria

Para realizar investimentos eficientes nos sistemas de transporte público é importante que a evolução demanda pelo modo de transporte seja acompanhada pelos governos. Este monitoramento deve direcionar políticas públicas e estratégias para que as

demandas por transporte atuais e futuras possam ser atendidas com um nível de serviço adequado à sociedade.

O aumento da demanda de passageiros sem o aumento correspondente da capacidade de oferta de lugares reflete-se no aumento da taxa de ocupação interna dos veículos, reduzindo o conforto dos usuários no interior dos veículos e aumentando a probabilidade de ocorrências que podem prejudicar a regularidade operacional, como por exemplo, as ocorrências de retenção das portas que aumentam os tempos totais de viagens.

1.2 O problema e sua relevância

O ponto de partida deste trabalho se baseia no estudo publicado por Viana *et al.* (2020) 26ª Semana de Tecnologia da AEAMESP - Associação dos Engenheiros e Arquitetos de Metrô.

Este estudo mostrou que existe correlação entre o número de passageiros transportados e o desempenho operacional realizado pelo operador do sistema metroviário do Rio de Janeiro. A aferição deste desempenho é realizada por meio de indicadores contratuais e outras medidas de desempenho criadas pelo próprio operador. É importante entender o que é medido por estes indicadores e saber interpretar os seus resultados, pois permite-se analisar os fatores que podem influenciar no resultado aferido.

Estes indicadores são utilizados para interpretar se o serviço é oferecido segundo o que foi idealizado pelo Governo e com nível de serviço esperado pela sociedade. Assim, entendê-los em profundidade ajuda a todos os atores envolvidos na prestação do serviço a diagnosticar a real situação do sistema metrô do Rio de Janeiro para entender o tempo ideal para realizar investimentos ou utilizar dos mecanismos contratuais disponíveis. Estes mecanismos podem ser a aplicação de alguma ação administrativa ou legal para a garantir a boa prestação do serviço público.

O metrô do Rio de Janeiro foi inaugurado em 05 de março de 1979 e inicialmente contava com 4,3 quilômetros de extensão. O seu traçado inicial fazia a ligação entre

cinco pontos da cidade representados pelas estações Praça Onze, Central, Presidente Vargas, Cinelândia e Glória. Inicialmente o sistema funcionava em horário reduzido entre 9h e 15h, no entanto, já ao final do mesmo ano teve seu horário de operação estendido até as 23h (METRORIO, 2021).

Ao analisar o histórico deste sistema é possível notar a receptividade e a adesão da população carioca ao novo modo de transporte desde seus primeiros anos de existência. Muito embora o sistema tivesse extensão bastante reduzida, já em seu primeiro ano de operação o metrô registrava uma demanda média diária de 60 mil passageiros por dia útil (ANTPTRILHOS, 2019).

A Tabela 1 - Evolução histórica de fatores relacionados à oferta e demanda apresenta os principais números que mostram a evolução da oferta de serviços e da demanda de passageiros pelo sistema.

Tabela 1 - Evolução histórica de fatores relacionados à oferta e demanda

Características	Inauguração	2019	Varição
Extensão	4,3	59,6	▲ 1286%
Linhas	1	3	▲ 200%
Estações	5	41	▲ 720%
Intervalos	8	2,5	▼ -69%
Veículos na operação	4	52	▲ 1200%
Carros por veículo	4	6	▲ 50%
Demanda (MDU)	60.000	883.000	▲ 1372%

Fonte: Elaboração própria

Os valores de demanda mostrados na tabela 1 auxiliam a entender melhor a dimensão da relevância deste modo de transporte para o Estado do Rio de Janeiro. Assim, a importância deste trabalho consiste na busca por entender os desafios de manter um alto nível de serviço aos usuários do sistema mesmo diante de condições de saturação da oferta do sistema. Parte-se do pressuposto que melhoria no desempenho do serviço ofertado afeta diretamente a população que utiliza o sistema público de transporte de passageiros e isto pode beneficiar a sociedade.

De maneira ampliada, este estudo é relevante pois explora um cenário que pode ser vivenciado por sistemas de transportes sobre trilhos localizados ao redor do mundo que podem ter problemas similares visto que o surgimento e expansão de megacidades é uma tendência global.

Busca-se entender como o aumento da demanda de passageiros pode afetar o cumprimento do plano operacional planejado e como os tempos de viagens e o desempenho operacional do sistema podem ser afetados. A seção 1.6 deste trabalho aborda com maiores detalhes o fluxo de atividades propostas para o tratamento do problema.

Assim emerge a pergunta sobre a qual o problema de pesquisa é derivado:

- Em que medida a saturação da relação oferta e demanda contribui para o aumento dos tempos de viagem e a redução do desempenho operacional do sistema metroferroviário estudado?

Adotaremos a conclusão do trabalho de Viana et. Al (2020) como hipótese básica a ser testada.

- O desequilíbrio entre a capacidade total de oferta de lugares e o volume de demanda realizado pode afetar negativamente o desempenho operacional de um operador metroferroviário.

Ainda, o trabalho se sustenta sobre a premissa:

- Sistemas metroferroviários que operam com intervalos próximos à capacidade tráfego projetada possuem menor resiliência para se recuperar de perturbações no sistema (CORMAN; D'ARIANO; HANSEN, 2014; SZYMULA; BEŠINOVIĆ, 2020). Neste tipo de cenário, cada uma das viagens planejadas conta com uma faixa de tempo para circular muito bem definida e com pouca margem de variação.

1.3 Justificativa

Esta pesquisa se justifica por abordar um tema de interesse comum aos três principais atores envolvidos no processo de fiscalização de um serviço concessionado: O governo, responsável por prover o serviço ou fiscalizar quando o serviço é concedido, o concessionário que deve cumprir os requisitos contratuais estabelecidos e a população que utiliza o serviço e espera que o valor pago pela tarifa de uso do transporte se converta em um serviço que cumpra os requisitos de segurança, conforto e pontualidade.

Portanto, estudar estes índices de desempenho é importante, pois, eles são uma das principais ferramentas utilizadas pelos agentes fiscalizadores para ter visibilidade da qualidade do serviço prestado pelo operador do sistema. Por consequência, é importante não somente entender o que eles medem, mas também os fatores que os podem afetar para que as ações corretivas ou os investimentos necessários sejam realizados de maneira apropriada.

Este entendimento é particularmente importante em contratos de concessão onde a responsabilidade pelos investimentos em bens reversíveis recai sobre o Estado. Assim, é possível avaliar melhor as opções de investimentos que podem proporcionar benefícios mais substanciais ao desempenho geral do sistema de transportes.

A administração do sistema de metrô do Rio de Janeiro foi concedida para iniciativa privada em dezembro de 1997 (METRORIO, 2021). No entanto, conforme prevê o artigo 175 da Constituição Federal da República Federativa do Brasil (CF), a responsabilidade pela prestação de serviços públicos incide sobre os entes públicos.

O agente público pode realizar concessões mediante processo licitatório, contudo, deve manter a fiscalização sobre os concessionários visando garantir o respeito aos direitos dos usuários e a manutenção de serviços em níveis adequados.

O contrato de concessão do sistema de metrô do Rio de Janeiro estabelece que a fiscalização dos serviços deve ser executada mediante observação dos índices de

avaliação da qualidade e segurança do serviço. Estes índices cobrem diferentes dimensões associadas a prestação dos serviços de transporte tais como: operação do sistema, manutenção dos ativos, segurança etc. (RIO DE JANEIRO, 1999).

Para cada dimensão relacionada à prestação do serviço de transporte metroviário de passageiros, o contrato de concessão referido estabelece valores de meta e a metodologia que deve ser utilizada para apuração dos resultados.

Neste trabalho será avaliada a dimensão operacional, que é a dimensão que avalia fatores relativos à pontualidade e a regularidade de viagens, fatores que afetam diretamente o tempo de deslocamento das pessoas e o seu planejamento diário.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Avaliar o impacto de variações na demanda de passageiros por estação no desempenho do serviço prestado pelo metrô do Rio de Janeiro.

1.4.2 Objetivos específicos

- Revisar a literatura a respeito da influência da demanda de passageiros realizada sobre os tempos de parada nas estações;
- Identificar na literatura os fatores que influenciam na regularidade operacional e sua relação com o nível de demanda realizada para o sistema de transporte.
- Criar um modelo que simule e quantifique a influência da demanda na variabilidade dos tempos de permanência dos trens nas estações e na capacidade de cumprimento integral das viagens programadas com grade horária planejada;
- Simular o impacto da demanda na regularidade dos tempos de embarque de passageiros realizado nas plataformas das estações.
- Identificar opções de investimento para melhorar as condições de regularidade operacional do sistema.

1.5 Delimitação do tema

A pesquisa se focará no estudo do sistema de metrô do Rio de Janeiro. Atualmente, este sistema é composto por 41 estações, três linhas em atividade e 14 pontos de integração (METRORIO, 2021). De acordo com informações da Associação Nacional de Transportadores de Passageiros sobre Trilhos (2019) o metrô do Rio de Janeiro é o segundo maior sistema de metrô do Brasil (ANTPTRILHOS, 2019).

Esse trabalho se limitará a análise da operação metroferroviária. Assim, as duas linhas de ônibus que fazem parte do sistema do metrô do Rio de Janeiro e realizam os trajetos Botafogo/Coca Cola x Gávea e Antero de Quental x Gávea, não serão abordadas neste estudo. Essa escolha foi feita porque trata-se de duas operações muito diferentes, e que a operação feita por ônibus nestes trajetos movimenta uma quantidade muito inferior ao volume de passageiros transportados nos trens. Este estudo está focado em sistemas de alta capacidade.

No aspecto geográfico, a pesquisa abrangerá o município do Rio de Janeiro, onde o traçado do metrô está totalmente contido. Uma das principais características desta região é concentrar uma grande quantidade de oportunidades de trabalho e educação na Região da Cidade do Rio de Janeiro (LOUREIRO; FRANÇA LEITE, 2013). Por consequência, existe uma forte atração e geração de viagens na região.



Figura 4 - Mapa esquemático de linhas do metrô do Rio de Janeiro. Fonte: MetroRio

Esta dinâmica socioeconômica influencia diretamente nas características de demanda realizada e pode ser verificada uma alta concentração de passageiros nos horários de pico, que coincidem com os horários de início dos horários de trabalho. Estes períodos do dia concentram grande demanda de pessoas indo para o Centro da Cidade e Zona Sul nos horários da manhã e retornando nos horários de pico da tarde (MIHESSEN, V.; MACHADO, L.; PERO, 2014).

Desta forma, os cenários avaliados neste trabalho se concentrarão na análise de interferências do aumento de passageiros no sistema, nos horários de pico dos dias úteis, pois este é o período mais crítico no aspecto de lotação do sistema. Analisando os aspectos de demanda, o período de pico é dividido em duas partes: pico da manhã e pico da tarde. Este trabalho se limitou à análise de viagens do pico da manhã.

1.6 Roteiro Metodológico

Este trabalho está dividido em seis capítulos sendo o primeiro deles esta introdução e os demais conforme apresentados a seguir:

Capítulo 2: Apresenta uma revisão de literatura relacionada ao surgimento e evolução e conceitos basilares do transporte ferroviário de passageiros, em especial para os sistemas de metrô.

Capítulo 3: Traz uma análise bibliográfica sobre os trabalhos científicos que relacionam o aumento da demanda de passageiros e a redução da pontualidade dos sistemas metroviários.

Capítulo 4: Apresenta o procedimento utilizado para a criação do modelo de simulação proposto neste trabalho.

Capítulo 5: Aplicação do método e análise de resultados encontrados nas simulações realizadas e as diferenças encontradas nos cenários de simulação propostos.

Capítulo 6: Conclusão e considerações finais. Nesta seção são destacadas as contribuições obtidas neste trabalho. Também são apresentadas as limitações da pesquisa e elaboradas recomendações para estudos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Transporte Ferroviário

2.1.1 Evolução histórica do conceito do modo de transporte ferroviário

A idealização de um tipo de transporte baseado em um caminho pré-definido e direcionado nos modelos tal qual ocorre no modo ferroviário teve origem há muitos séculos. Já na época da Grécia Antiga, por volta do século 6 a.C., existem relatos históricos de espécies de carruagens empurradas por escravos ao longo de sulcos de calcário para realizar o transporte de barcos na zona de Corinto. Esta espécie de estrutura relembra os primórdios dos carris naquela época (LEWIS, 2001).

Com o passar do tempo esta ideia de transporte foi sendo aperfeiçoada e repensada para novos formatos que utilizavam novos materiais para a confecção dos carris, como a utilização de madeira como componente, e foram utilizados outros elementos para geração da força motriz necessária para promover os deslocamentos (AZÉMA, 1997, HILTON, 2007).

Entretanto, o desenvolvimento histórico do transporte ferroviário, em escala comercial, teve início somente no século XIX. Inicialmente, a principal aplicação adotada para o uso deste tipo de transporte era para realizar operações de deslocamento da produção de minas até os locais terminais de distribuição desta produção e este tipo de transporte se tornou uma das invenções mais notórias que contribuíram para o desenvolvimento da sociedade durante o período da revolução industrial.

Embora o surgimento do modo ferroviário esteja relacionado com objetivo de transporte de bens, não demorou muito para ocorresse uma adaptação para que o novo modo de transporte também fosse utilizado com a finalidade de transportar pessoas.

A primeira viagem realizada em uma ferrovia ocorreu em caráter inaugural em um trecho de 25 km entre Stockton e Darlington, no interior da Inglaterra, em 27 de setembro de 1825 e realizou o transporte de bens e pessoas na mesma composição.

Onze anos mais tarde foi inaugurada a primeira linha de trem suburbana do mundo, ligando London Bridge ao subúrbio londrino de Greenwich (FREMDLING, 2013).

Desde então, o sistema ferroviário de passageiros passou por uma expansão progressiva, dada a sua capacidade de transporte em massa, segurança e previsibilidade. No contexto do desenvolvimento das grandes cidades a grande inovação para este modo de transporte se deu pela criação dos sistemas de metrô. De acordo com Organização Internacional de Transporte Público (UITP) os sistemas de metrô possuem uma importância crítica para a mobilidade das sociedades que a cada vez mais se tornam urbanizadas e com tendência de concentrações populacionais.

Segundo uma pesquisa conduzida pela UITP, no ano de 2017, os sistemas de metrô estavam presentes em 182 cidades e em 56 países e eram responsáveis pelo transporte de mais de 168 milhões de pessoas por dia (UITP, 2018)

2.1.2 Conceitos fundamentais do modo ferroviário

O transporte ferroviário realiza o deslocamento de pessoas e bens entre locais utilizando um comboio, unidade locomotora ou outro veículo semelhante que realiza a tração de carros ou vagões, onde são transportadas cargas e/ou passageiros (UITP, 2018).

A circulação do comboio, ou veículo equivalente utilizado no transporte, ocorre ao longo de uma via-férrea composta por carris dispostos ao longo do percurso estabelecido. Paralelamente a esta estrutura física por, onde circulam os veículos, existem outros sistemas que auxiliam no tráfego dos veículos, tais como sistemas de sinalização ou sistemas de fornecimento de energia, quando o sistema é do tipo eletrificado. (CARVALHO, 2019).

Além destes componentes, na grande maioria dos sistemas ferroviários em operação, existe o fator humano que está presente nos condutores dos veículos ferroviários e/ou na gestão do tráfego e tarefas de suporte ao sistema (RYAN *et al.*, 2021).

De acordo com a definição de Pachl (2014) um sistema ferroviário é formado por pelo menos três elementos fundamentais:

1. **Infraestrutura:** Esta parte se refere às vias por onde ocorre o tráfego dos veículos em operação comercial e/ou em movimentos auxiliares de manobra e posicionamento dos comboios, equipamentos de sinalização, estações e demais equipamentos que provêm a condição necessária para o tráfego dos veículos, tais como linhas de abastecimento elétrico para os veículos eletrificados e redes de transmissão de dados sinais por onde ocorre todo o processo de monitoramento e controle da movimentação e de todos os eventos que ocorrem ao longo do sistema ferroviário.
2. **Material Rodante:** Esta parte se refere ao veículo que realiza o deslocamento sobre a infraestrutura. Para o transporte de cargas geralmente este conjunto é composto por locomotivas e vagões, já para o setor de passageiros a composição de sistemas mais modernos utiliza veículos com carros quase sempre movidos por tração elétrica e possuem uma formação onde existem carros motores que são responsáveis por gerar e transmitir a força motriz para os carros rebocados.
3. **Regras de operação e procedimentos para a segurança e eficiência:** Esta é a parte normativa que delimita os modelos operacionais e as regras para circulação dos veículos ferroviário, de maneira que o tráfego de veículos possa ocorrer de maneira ordenada, controlada e segura.

2.2 Capacidade Ferroviária

Para melhor compreender as capacidades e restrições de uma operação de transporte ferroviário é preciso entender como estes fatores interagem entre si. A capacidade de tráfego instalada em uma ferrovia possui relação direta com estes três fatores definidos anteriormente.

De acordo com Carvalho (2019), a capacidade das vias ferroviárias é definida como a quantidade de trens por hora que é possível de circular em uma via, mantendo distância de segurança entre os trens, respeitando as regras de operação ferroviária.

A capacidade de tráfego teórica de uma ferrovia é medida na quantidade de trens em circulação. Este fator pode ser entendido como o número máximo de veículos circulando ao mesmo tempo no sistema quando submetidos a uma determinada condição operacional e respeitando os quesitos de segurança sem perder nenhuma oportunidade para circular, ou janelas de tempo para circulação de um trem ou viagem programada (INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS, 2004).

Alguns autores, no entanto, defendem que este valor de capacidade teórica é utópico e que é necessário aplicar um fator de produtividade para que se obtenha o valor de referência da capacidade real da rede (STOK, 2008; UIC, 2004). Estes estudiosos argumentam que os cálculos das capacidades teóricas ocorrem utilizando condições controladas e ideais, o que nem sempre se mostra possível no mundo real, tornando-se assim um valor quase improvável.

A capacidade ferroviária pode ser afetada por fatores internos, relativos à eficiência operacional da companhia operadora, pela condição das infraestruturas de transporte e por fatores externos, tais como condições climáticas adversas entre outras que podem alterar os tempos mínimos padrão utilizados no planejamento teórico.

Assim, essa medida de capacidade pode ser tomada como uma referência inicial que deve ser refinada por outros métodos de avaliação. Existem muitas possibilidades para se medir a capacidade de uma ferrovia.

Assad (1980) afirma que existe uma vasta gama de metodologias disponíveis para auxiliar o processo de planejamento de operações em ferrovias e tais possibilidades são organizadas em três grupos:

- 1 - Modelos analíticos e otimização;
- 2- Modelos de Filas;
- 3 - Modelos de Simulação.

Dentre as metodologias destacadas acima, as ferramentas de simulação se mostram como uma opção particularmente interessante, pois permitem a criação de modelos que

conseguem captar de maneira mais realista as especificidades do sistema estudado, submeter o sistema a situações variadas em condições ambientais variáveis e, conseqüentemente, captar melhor as respostas do sistema frente a variações nas condições ideais e, assim, gerar um melhor entendimento das limitações do sistema (SIEFER, 2008).

Como implicação, este melhor entendimento dos limites permite aos tomadores de decisão e aos planejadores de operações ferroviárias conhecerem melhor as restrições de seu sistema e ajustar seu plano operacional para adotar as melhores estratégias dentre as possibilidades existentes. Além do aspecto operacional, esta compreensão também possibilita ações de planejamento com horizontes mais longínquos, tais como análise de opções de investimentos em soluções mais prioritárias para aumentar sua capacidade e a eficiência do transporte (SANTOS, 2014).

2.2.1.1 Funcionamento dos sistemas de sinalização

A capacidade de tráfego dos sistemas ferroviários modernos possui uma relação direta com a capacidade instalada permitida pelos sistemas de sinalização ferroviária. Isto ocorre porque os veículos possuem grandes massas e circulam sobre uma superfície de trilhos de metal que possuem baixo coeficiente de atrito. Este ambiente requer que este tipo de sistema adote condições especiais para proporcionar controle do tráfego e uma circulação mais segura dos veículos.

Dada a condição física o tempo necessário para a parada completa do material rodante é muito maior que os tempos usuais no modal rodoviário, onde o coeficiente de atrito é até oito vezes maior, por exemplo. Por isso, os sistemas de sinalização são importantes estruturas que proporcionam a movimentação segura dos veículos ao longo do sistema ferroviário.

Na operação controlada por sinalização, pode haver sinais fixados ao lado e/ou sobre a via ou sinais embarcados. Neste caso, há um conceito importante a ser destacado, o de seção de bloqueio ou bloco de sinalização.

A seção de bloqueio é uma divisão da via de circulação com o propósito de distanciar trens de forma segura. Nestes termos, um trem não pode adentrar uma seção até que ela seja fisicamente liberada pelo trem à frente (PACHL, 2014)

Os sistemas de sinalização modernos estão construídos sobre o conceito de controle das ocupações das seções de bloqueio. Este conceito secciona toda a extensão do sistema ferroviário em diferentes regiões de controle consecutivas. Cada uma destas regiões possui uma identificação individual e física própria e um sistema que monitora se existem veículos ferroviários nela situados (KANSO, MOLLER, SETZER, 2009).

Em termos de operação sinalizada com seções de bloqueio fixas, é possível descrever o processo das regras de licenciamento implementadas no sistema, e que garantem a circulação segura dos trens, da seguinte maneira:

1. O trem posicionado à frente deve liberar completamente a seção de bloqueio que ocupava;
2. O trem à frente deve estar protegido da movimentação dos trens que estiverem no mesmo sentido de circulação e posicionados em posições anteriores da via;
3. O trem à frente deve estar protegido de movimentos de trens em sentido contrário.

Cada uma destas seções de bloqueio é protegida por um sinal que indica a situação atual da seção de bloqueio situada a jusante. A figura a seguir ilustra um modelo simplificado de como funciona os sistemas de sinalização baseados no controle por blocos fixos.

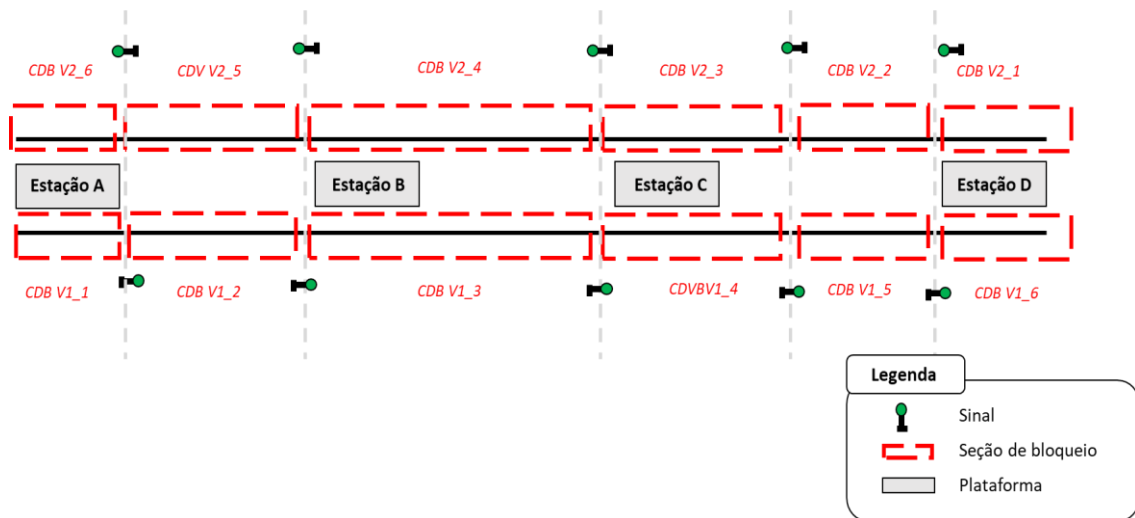


Figura 5 – Representação esquemática simplificada das seções de bloqueio.

Segundo Pachl (2014), o sistema de sinalização de trens por blocos fixos é o mais utilizado atualmente em todo o mundo. A distância de uma seção de bloqueio é calculada utilizando como parâmetros: o tamanho dos trens que circulam na malha ferroviária e as curvas de frenagem destes trens, adicionalmente são utilizados um valor de segurança para o caso de situações imprevistas.

No sistema de sinalização com blocos fixos, os trens são detectados através de seus eixos e rodas por de uma corrente de baixa tensão inserida nos trilhos. Ao perceber a passagem do trem, o segmento da via sofre um curto-circuito, interpretando que naquela seção de bloqueio existe um trem, ou seja, esta seção de bloqueio está ocupada e nenhum outro veículo poderá acessá-la.

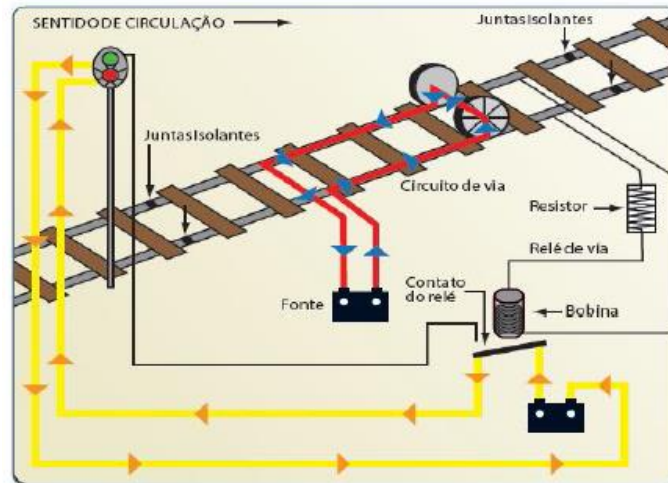


Figura 6 – Típico Circuito de via.

Uma das limitações apresentadas neste tipo de sistema é que se conhece apenas que existe uma ocupação (trem) na seção de bloqueio, todavia não é possível identificar com um maior nível de precisão qual é a exata localização do trem dentro de toda a extensão física do circuito de via onde ele está situado. Assim, a forma de obter uma localização mais precisa do veículo é possuir seções de bloqueio menores possíveis e que ao mesmo tempo mantenham as características de segurança ferroviária requeridas.

Por exemplo, se o circuito de via ocupado tiver um tamanho de 3 km, muito maior do que um tamanho de trem típico de metrô de 6 carros que é de aproximadamente 120 metros, não será possível determinar se o veículo está no início ou no fim do circuito ocupado e o sistema de sinalização só receberá uma atualização quando a seção de bloqueio for totalmente desocupada (TCRP,2012).

A equação a seguir mostra a fórmula de cálculo para a determinação da distância mínima entre trens, segundo Pachl (2014).

$$D_H = T_{Trem1} + D_S + D_{Fmax} + S_B \quad (1)$$

Onde:

D_H = Distância mínima entre trens

T_{Trem1} = Tamanho do trem 1

D_S = Distância de segurança

D_{Fmax} = Distância máxima de frenagem

S_B = Tamanho da seção de bloqueio

Assim, é possível notar que o headway de uma ferrovia está diretamente relacionado com o tamanho das seções de bloqueio. Como consequência, a capacidade máxima de tráfego de veículos e a capacidade máxima de geração de oferta de lugares aos passageiros está relacionada com esta importante característica da infraestrutura ferroviária.

2.3 Planejamento e Controle da Operação

O planejamento da operação ferroviária é uma declaração onde são estabelecidos todos os parâmetros que serão utilizados para organizar a circulação dos veículos ferroviários ao longo do sistema para que a circulação ocorra com maior regularidade e confiabilidade.

A grade horária de trens é o documento que consolida as informações do plano operacional idealizado e declara o volume de oferta de serviços planejados. Um dos principais dados de entrada para a confecção de uma grade horária efetiva é a demanda esperada para o serviço (HANSEN, 2010). A demanda para o serviço é o ponto de partida para a definição do dimensionamento das necessidades para o dimensionamento de recursos necessários, definição dos níveis de serviço e da estratégia operacional que deve ser adotada. Portanto, um planejamento mais adequado da operação de transportes públicos, onde o modo metroviário se insere, passa também por uma avaliação da dinâmica da região onde o sistema de metrô atende e pelos fatores de elasticidade que podem influenciar esta demanda, causando impactos sobre a estratégia operacional planejada para o sistema de transporte (MELO, 2019).

Para Lusby *et al.* (2011) a grade horária planejada é um documento que consolida a estratégia operacional idealizada para acomodar da maneira mais adequada possível dois importantes aspectos: a demanda dos passageiros e a disponibilidade de recursos, especialmente do material rodante. A criação do plano operacional é definida pelo ajuste de múltiplas variáveis que estão relacionadas com os recursos disponíveis (total de ativos disponíveis e pessoal), a necessidade de atividades de manutenção e a frequência necessária para cobrir a demanda para o serviço.

Segundo Pachl (2014), este tipo de documento geralmente alguns itens são básicos:

- Quais são os dias em que cada um dos trens irá circular, ou seja, qual é a recorrência da oferta do serviço planejado. Esta análise passa pela avaliação da dinâmica de movimentação social e dos motivos de deslocamento realizados pelos usuários do sistema
- Qual será a rota utilizada pelo veículo ou o trajeto que executará ao longo do seu percurso. Este fator diz respeito a estratégia de distribuição da oferta ao longo do dia, em consonância com as características econômicas e sociais da região atendida. A análise deste tipo de característica pode possibilitar a implantação de serviços que atendem com maior frequência uma região específica da rede, maximizando a eficiência do uso dos ativos e/ou possibilitando oportunidades para realizar atividades de manutenção durante a operação comercial, sem prejuízo ao usuário do sistema;
- Velocidades máximas autorizadas para o deslocamento dos veículos em cada uma das seções de via. As características da infraestrutura instalada definem os limites máximos de velocidades possíveis de realizar ao longo da via para que a segurança de tráfego seja garantida. Estas velocidades máximas, por sua vez, delimitam os tempos mínimos de deslocamento entre trechos (MOAVENI, 2020);
- A definição detalhada dos horários de chegada e partida planejados para cada uma das estações que compõem a rede de transportes por onde o veículo ferroviário se deslocará. Depois de calcular o tempo de circulação entre estações, deve ser determinado o tempo de parada nas estações atendidas pelo serviço de trens em função da demanda prevista, a conjunção do tempo de circulação entre estações, os tempos de parada nas estações e o horário de

partida das viagens planejadas gerará uma previsão do horário de passagem de cada uma das viagens planejadas para todos os locais atendidos pela viagem;

Bababeik *et al.* (2018) também acrescentam que as demandas por manutenção dos ativos de infraestrutura são um importante fator que deve ser considerado na confecção da grade horária. O planejamento da operação deve considerar as faixas horárias em que o sistema estará disponível para realizar atividades de manutenção para que a disponibilidade da infraestrutura seja garantida. Assim um planejamento mais eficiente deve considerar os momentos em que existe queda de demanda para considerar as possibilidades de manutenção programada.

A confiabilidade da infraestrutura metroferroviária é um aspecto chave para a confiabilidade do serviço, pois, neste modo de transporte a ocorrência de falhas que afetem as vias ferroviárias ou infraestrutura pode gerar indisponibilidade de uma via de tráfego e, conseqüentemente, a interrupção parcial ou total do serviço, pois geralmente existem caminhos limitados alternativos limitados.

Em suma, uma grade horária eficiente é aquela que consegue conciliar a demanda de transporte com a oferta planejada utilizando da maneira mais adequada os recursos operacionais disponíveis: veículos, pessoal, via permanente, sistemas auxiliares, estações etc.

3 DEMANDA E O IMPACTO DA VARIABILIDADE DOS TEMPOS DE VIAGEM

A revisão de literatura construída neste capítulo tem como objetivo apresentar resultados de estudos anteriores sobre a relação de causalidade entre o aumento da demanda de passageiros e o aumento da variabilidade dos tempos de viagens. Este capítulo se concentrará a compreender se a hipótese básica proposta neste trabalho possui validade ou não, mediante a análise estruturada dos resultados das pesquisas de importantes autores da comunidade científica que se dedicam ao estudo desta temática.

Como segunda contribuição, a análise realizada neste capítulo ajudou na proposta do algoritmo de simulação utilizado no capítulo 4, pois, as variáveis utilizadas no processo de simulação foram embasadas nos principais fatores causadores de variabilidade dos tempos de viagem que foram indicados por estes autores.

3.1 A importância do controle dos tempos de viagens para a regularidade e pontualidade do sistema.

Uma das principais características esperadas do modo ferroviário, onde os sistemas de metrô se incluem, é a regularidade e pontualidade. Estes fatores, juntamente com a alta capacidade de transporte de pessoas por intervalo de tempo, conferem a estes sistemas suas principais vantagens competitivas em relação aos demais modos de transporte e podem ser os argumentos que viabilizam a implantação ou expansão de projetos ferroviários, visto que estes demandam um investimento financeiro elevado (MANDHANI *et al.*, 2021; BUDIONO, 2009)

O controle e a aderência dos tempos de viagens programados e realizados é um fator importante para o sucesso de uma operação ferroviária. Esta importância pode ser verificada pela fórmula apresentada por Pachl (2014) para dimensionamento da quantidade de trens necessários para operar em intervalos fixos por intervalo de tempo.

$$N_t = \frac{T_{ciclo}}{I_{fixo}} \quad (2)$$

Onde:

N_t = Quantidade de trens necessários

T_{ciclo} = Tempo de ciclo do trem

I_{fixo} = Intervalo fixo definido para a faixa horária

O tempo de ciclo compreende o tempo decorrido entre o horário de partida de um trem de sua estação de origem até o que este trem esteja novamente nesta mesma estação de origem e em condições para realizar uma próxima viagem, isto inclui todas as manobras e atividades de *setup* necessárias.

O tempo de intervalo fixo representa o intervalo entre partidas de trens em uma faixa horária. O dimensionamento da quantidade máxima de trens necessários para operar é obtido utilizando o valor do menor intervalo programado para o dia analisado.

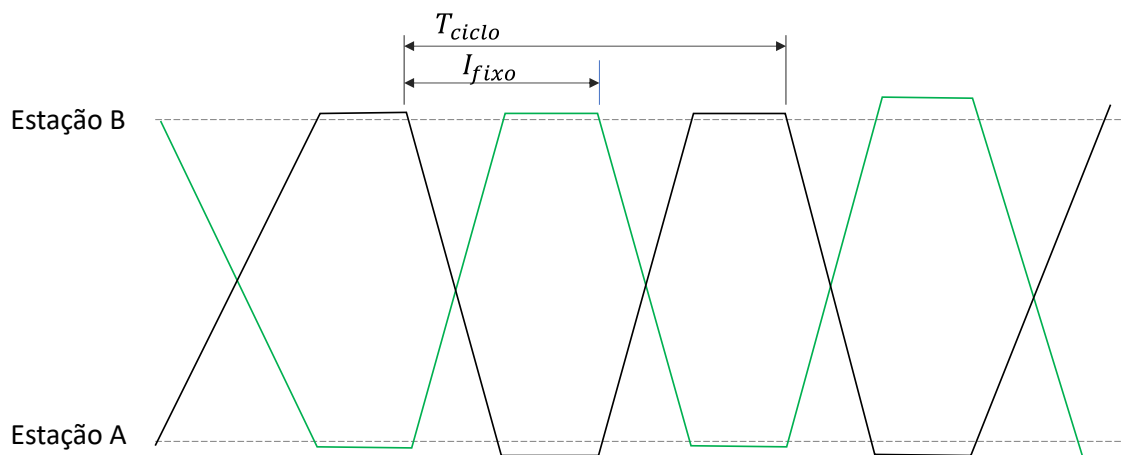


Figura 7 - Tempos de ciclo e intervalos.

Conforme exposto, o tempo de viagem possui uma influência direta da regularidade da geração de viagens, pois o tempo de viagem é um dos componentes do numerador da equação 2. Logo, se o valor de ciclo aumentar consideravelmente, é preciso que o valor do intervalo programado aumente para que o número de trens necessários se mantenha constante.

Desta maneira, aumento nos tempos de viagem realizados podem impactar diretamente na quantidade de trens necessários e, conseqüentemente, a capacidade do cumprimento dos intervalos programados entre viagens, sobretudo nos horários de maior demanda (ZHENGWEN *et al.*, 2020).

Os tempos de viagem são compostos por duas parcelas: os tempos de circulação entre estações e os tempos permanência nas estações para embarque e desembarque de passageiros. Os tempos entre estações dependem de vários fatores dentre os quais se destacam as restrições de velocidades impostas pelo traçado geométrico e características do material rodante, aspectos de segurança operacional, existência de passagens em nível, sistemas de sinalização instalados etc. Os tempos de parada nas estações, todavia, estão relacionados com os tempos mínimos necessários às operações de embarque e desembarque de clientes nos trens.

Logo, o aumento dos tempos de viagem pode demandar o uso de mais veículos em circulação para poder manter intervalo planejado entre trens. Entretanto, o número de trens é um valor geralmente limitado, visto que, trata-se de um ativo que possui alto valor de aquisição e manutenção e ainda que muitas vezes estes veículos são fabricados sob encomenda para se adaptarem a especificidades da infraestrutura do operador metroviário (BRAGE; GRAHAM, 2014).

Percurso	Sentido	Sequência	Arco	Origem	Destino	Tempo	Tempo Parada	Marcha-Tipo
L1	2	1	PCH-LUN	Estação 11	Estação 10	00:02:12	00:00:20	100%
L1	2	2	LUN-BBL	Estação 10	Estação 9	00:01:44	00:00:20	100%
L1	2	3	BBL-CRR	Estação 9	Estação 8	00:01:16	00:00:20	100%
L1	2	4	CRR-PTD	Estação 8	Estação 7	00:00:54	00:00:20	100%
L1	2	5	PTD-CDJ	Estação 7	Estação 6	00:01:27	00:00:20	100%
L1	2	6	CDJ-UNI	Estação 6	Estação 5	00:01:25	00:00:20	100%
L1	2	7	UNI-CLI	Estação 5	Estação 4	00:01:12	00:00:20	100%
L1	2	8	CLI-CNS	Estação 4	Estação 3	00:00:50	00:00:20	100%
L1	2	9	CNS-PRF	Estação 3	Estação 2	00:00:45	00:00:20	100%
L1	2	10	PRF-TCH	Estação 2	Estação 1	00:00:52	00:00:00	100%

Figura 8 - Exemplo de um planejamento de tempo de percurso de trens.

Fonte: Elaboração própria.

3.2 Aspectos causadores de desvios nos tempos de viagem

Em um estudo conduzido em na cidade de Estocolmo por Palmqvist *et al.*, (2017) verificou-se que o fator dos atrasos é o principal fator responsável pela satisfação dos clientes com o serviço e, portanto, é um fator fulcral para gerar maior atratividade para a utilização do modo ferroviário. Esta constatação também foi confirmada no sistema de metrô do Rio de Janeiro. Na pesquisa anual de sobre a qualidade do serviço ofertado pelo metrô do Rio de Janeiro, o atributo tempo de viagem e pontualidade foi apontado por mais de 80% dos entrevistados como o principal fator considerado para escolher realizar suas viagens por este modo de transporte, logo, também é um de seus diferenciais para atrair mais demanda (MANCINI *et al.*, 2018).

Dada a expansão dos sistemas de metrô nas últimas três décadas em todo o mundo e ao aumento da demanda de passageiros por este tipo de transporte, a temática da pontualidade dos serviços de trens tem se tornado objeto de estudo de diversos pesquisadores do meio científico. Esta matéria tem sido analisada sobretudo para questões relacionadas ao aumento da capacidade de tráfego de uma rede, um dos principais ramos de pesquisa do setor ferroviário (HANSEN, 2001).

A pontualidade é frequentemente utilizada como medida discreta, relacionada a um nível pré-definido de desvio aceito. Quando um trem circula dentro de uma faixa horária planejada acrescida de um fator de desvio de tolerância permitido, considera-se que o trem está pontual ou com um desvio pontual que não afeta todo o sistema. (RUDNICKI ,1997)

A pontualidade, ou melhor, a falta de pontualidade, é geralmente referida quando os trens circulam em faixas horárias posteriores às inicialmente programadas e, isto é particularmente crítico em redes onde a densidade de tráfego é muito alta e os intervalos planejados são muito próximos aos limites teóricos do projeto de infraestrutura instalado.

Rudnicki (1997) define a pontualidade como "uma característica que consiste em que um veículo definido chega, parte ou passa em um ponto pré-definido em um momento previamente estipulado".

A definição de pontos e tempos pré-definidos é declarada no plano operacional, conforme explicado na seção 2.3 deste trabalho. Este plano gera os parâmetros de interpretação de que a pontualidade pode ser medida em qualquer ponto do trajeto executado, onde o horário de chegada ou partida de um trem é comunicado.

Desta forma, ainda que seja mais recorrente a aferição da pontualidade no destino, a pontualidade pode se relacionar com qualquer ponto ao longo do trajeto do trem e a aferição da pontualidade dos veículos em tempo real pode subsidiar o Centro de Controle Operacional (CCO) na definição de estratégias de contorno e mitigação de impactos operacionais e ao passageiro do sistema.

A figura a seguir ilustra, em um gráfico de linhas no formato espaço x tempo, a ocorrência de um atraso. Na imagem se pode identificar as viagens planejadas sendo representadas por linhas pontilhadas e o registro da correspondente viagem executada sendo representada no formato de uma linha contínua. Nota-se que a viagem com saída realizada para as 04h00 partindo da estação 7 começa a se desviar do seu valor programado a partir da estação 3. Este desvio caracteriza um atraso que pode ter maior ou menor impacto, dependendo da densidade de tráfego e dos volumes de demanda de clientes por intervalo de tempo. Ainda é possível verificar que o atraso se propaga não somente no sentido inicial da viagem planejada, mas também na sua viagem de retorno. Todavia, na estação 6, ocorre uma recuperação do atraso e a viagem consegue retornar aos seus horários inicialmente definidos. A recuperação deste tipo de atrasos pode ocorrer pelo uso de diversas ações de regulação, dentre as quais é possível citar a redução dos tempos de parada realizados em estações com baixa demanda.

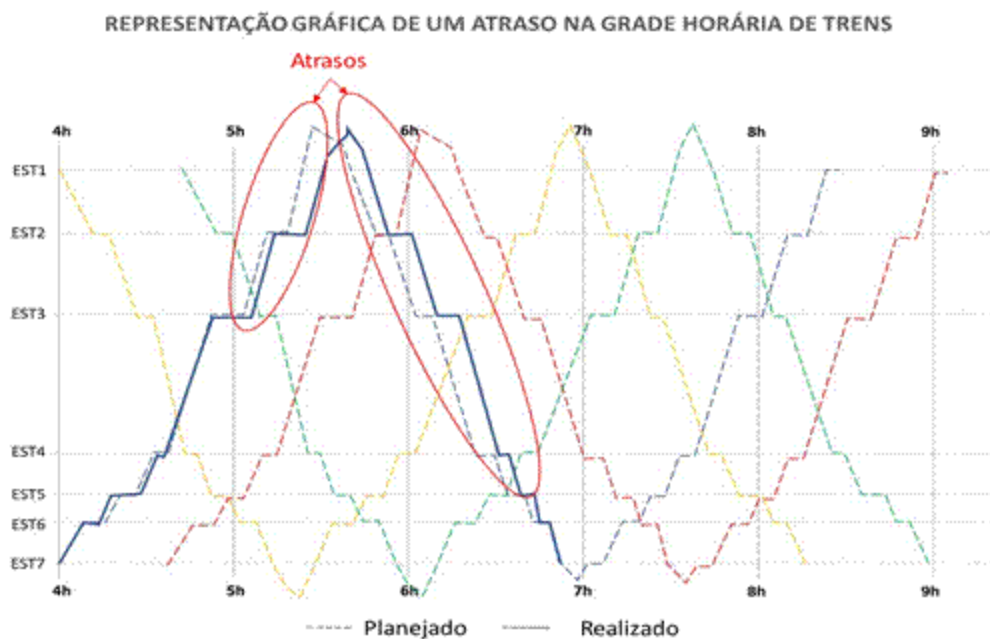


Figura 9 – Representação gráfica de um atraso na grade horária realizado durante a operação comercial. Fonte: Elaboração própria

No sistema de metrô do Rio de Janeiro, a influência do fator tempo de viagem é mensurada e acompanhada por indicadores de desempenho. O fator da regularidade do serviço prestado e da pontualidade na partida e no percurso dos trens está refletido nos indicadores operacionais contratuais definidos no Contrato de Concessão do sistema de metrô do Rio de Janeiro.

Dois principais indicadores contratuais destinam-se ao monitoramento desta variável. O primeiro destes indicadores é ICPO – Índice de Cumprimento da Programação da Oferta. Este indicador consiste na aferição da aderência entre o número de viagens realizadas durante a operação comercial e o número de viagens planejadas na grade horária teórica aprovada pela Agência Reguladora. É muito importante monitorar este indicador porque ele traduz o percentual da oferta de lugares perdida por desvios que ocorrem ao longo da operação comercial.

O segundo indicador é o IRIT – Índice de Regularidade dos Intervalos entre Trens. Este indicador mede a aderência do intervalo de passagem realizado pelos trens em relação ao intervalo programado entre trens em um determinado local da linha, em um

determinado sentido de circulação. Esta medição é realizada em pontos estratégicos situados ao longo da rede de transporte, conforme definição contratual.

Uma das principais funções do indicador IRIT é verificar se o intervalo entre trens está regular, ou seja, dentro dos limites de variação aceitáveis, ao longo de todo o sistema. A alteração ou desvio do intervalo nas estações intermediárias do sistema são decorrentes dos atrasos nos tempos de viagem, tal como defendido por Rudnicki (1997)

3.3 Os fatores que afetam a pontualidade dos trens

Nesta seção serão apresentados argumentos utilizados pelos autores estudiosos do fenômeno dos atrasos no modo ferroviário através de um processo de revisão bibliográfica. Também serão expostos os principais fatores apontados por estes autores como aqueles que mais contribuem para a ocorrência da variabilidade dos tempos de permanência dos trens nas estações e se o fator demanda é realmente identificado como maior causador do fenômeno analisado.

Olsson e Haugland (2004) defendem para ferrovias com linha dupla, com sentido de tráfego direcional, como é o caso do metrô do Rio de Janeiro, dois fatores são mais determinantes para geração de atrasos: a taxa de utilização da capacidade de rede instalada e o número de passageiros que utilizam o sistema de transporte.

Em seu estudo realizado em ferrovias da Noruega para identificar os fatores que impactam na pontualidade dos trens, os autores reportam que em áreas mais congestionadas, áreas típicas onde os sistemas de metrô são implantados, a gestão dos tempos de embarque e desembarque de passageiros é o fator maior importante para garantir um nível de pontualidade desejado,

Em pesquisa realizada nos sistemas ferroviários de Tokyo e Estocolmo, Palmqvist *et al.* (2020) descobriram que a maior parte dos atrasos ocorrem nas estações sob a forma de pequenos desvios de tempo realizado nos tempos de permanência dos trens nas plataformas para as atividades de embarque e desembarque de passageiros. Nesta

pesquisa verificou-se que em Estocolmo 91% dos atrasos acontecem nas estações enquanto em Tokio este valor foi de 88%.

Cornet *et al.* (2019) também reforça o argumento de que a principal fonte de atrasos no sistema ferroviário está relacionada aos processos de entrada e saída dos passageiros nos trens. As observações do seu estudo foram realizadas no sistema ferroviário francês, especialmente em Paris. Os resultados obtidos reforçam a importância do planejamento de tempos exequíveis e da característica de propagação dos atrasos para as viagens posteriores. Os autores reforçam que em momentos de alta demanda um atraso de uma viagem pode gerar a sobrecarga das viagens posteriores pois as plataformas acumulam maior quantidade de passageiros e os conflitos de entrada e saída de passageiros nas plataformas podem aumentar os tempos de permanência dos trens em plataforma em uma espécie de efeito em cascata.

Outro estudo realizado por Christoforou *et al.* (2020) na França, em Nantes, analisou os registros de alguns anos de operação relativos à lotação das plataformas do sistema e a relação de causalidade com a regularidade dos tempos de permanência dos trens nas estações. Os resultados obtidos através das análises gráficas e dos modelos de regressão linear múltipla feitos pelos autores ratificaram a causalidade entre o nível de demanda para o serviço e a variabilidade nos tempos de permanência dos trens e, conseqüentemente, dos atrasos. Os autores do trabalho reforçam que o número de embarques, desembarques e lotação interna impactam de maneira muito significativa o nível de variabilidade dos tempos de embarque e mais ainda afirmam que as estações mais longe do terminal geralmente acumulam efeitos maiores decorrentes da lotação interna acumulada.

Oliveira *et al.* (2019) traz outro fator relacionado à demanda que influencia de maneira significativa a variabilidade dos tempos de embarque: a distribuição dos passageiros na extensão da plataforma. Em estudos conduzidos no Reino Unido, os autores identificaram que os passageiros tendem a se aglomerar nos carros mais próximos aos acessos: tanto aqueles mais próximos às escadas como em função dos locais da posição do carro em relação à saída da estação de destino. Estudos conduzidos por Szplett *et al.*

(1984) e Krstanoski (2014) no Canadá também encontraram resultados similares aos obtidos por Oliveira.

Estes fenômenos podem contribuir para o aumento do tempo de permanência dos veículos ferroviários na plataforma, uma vez que gera uma distribuição desigual da lotação dos veículos entre os carros da composição metroviária. Os autores apresentam contribuições e sugestões de ações de intervenção na infraestrutura e sinalização das estações para estimular uma melhor distribuição da lotação ao longo de todo os carros do veículo e assim no tratamento desta situação indesejada.

A seguir é feito um resumo de 21 autores avaliados e dos fatores que eles apontaram em seus estudos como sendo os mais relevantes para a geração de atrasos no modo ferroviário.

Tabela 2 - Análise Bibliográfica dos autores

Autores	Embarque	Desembarque	Lotação Interna	Distribuição entre os carros	Layout da estação	Número de portas do veículo	Dimensão das portas	Taxa de utilização da capacidade instalada
Daamen <i>et al.</i> (2008)	x	x	x	x	x	x		
Lin e Wilson (1992)	x	x	x					
Harris (2006)	x	x	x	x	x	x		
Cornet <i>et al.</i> (2019)	x	x	x	x				
Wiggenraad (2001)							x	
Currie <i>et al.</i> (2013)	x	x	x	x				
Christoforou <i>et al.</i> (2020)	x	x	x	x	x	x	x	
Olsson & Haugland (2004)	x	x	x					
Palmqvist <i>et al.</i> , 2017								
Kunimatsu <i>et al.</i> (2012)	x	x	x					
Ceder & Hassold (2015)	x	x	x					
Zakeri e Olsson (2018)	x	x	x					
Riksrevisionsverket (1986)								
Heinz (2003)	x	x	x					
Skartsæterhagen (1993)								x
Skjæret (2002)								x

Szplett <i>et al.</i> (1984)	x	x	x	x	x			
Krstanoski (2014)	x	x	x	x	x			
Gibson <i>et al.</i> (2002)								x
Olsson <i>et al.</i> (2004)	x	x	x					x
Hansen e Yuan (2002)	x	x	x					x
Frequência	15	15	15	7	5	3	2	5

Fonte: Elaboração Própria

Nota-se que a maioria dos autores estudados (mais de 71%) apontam os fatores relacionados à demanda como os mais relevantes para geração de atrasos. Outros fatores mencionados são o layout interno das estações e trens e a capacidade de tráfego instalada. Estes aspectos foram utilizados para a construção do modelo de simulação utilizado. O detalhamento da metodologia, dados de entrada e resultados serão apresentados nos capítulos 4 e 5.

4 DADOS E MÉTODOS

Este capítulo tem por objetivo apresentar os procedimentos e premissas utilizadas no modelo de simulação proposto para este estudo. Também serão apresentados os dados de entrada utilizados e descritas eventuais simplificações ou ajustes feitos para cobrir especificidades do sistema estudado.

4.1 Método utilizado

4.1.1 Procedimento de simulação e sua aplicação no sistema metroferroviário.

Nesta seção será detalhado o procedimento utilizado para a criação do modelo de simulação proposto para aplicação no metrô do Rio de Janeiro.

Os vários recursos ferroviários podem ser examinados individualmente, mas, em redes mais complexas, a taxa de saída de um elemento tem forte impacto na taxa de entrada em um elemento seguinte. Assim é possível dizer que existe um efeito em cascata na rede ferroviária, tornando a análise isolada desaconselhada. Desta forma, a utilização de da Teoria de Filas e a Simulação são mais recomendadas, pois, são ferramentas mais precisas para o entendimento de redes ferroviárias (WEIK *et al.*, 2016).

De acordo com Banks (1984), a técnica de simulação pode ser entendida como uma emulação de um processo que existe no mundo real ao longo de um determinado tempo. A simulação, então, pode ser realizada por meios manuais ou por recursos computacionais.

Os resultados dos processos de simulações também podem criar um histórico de cenários que permitem análises de comportamentos esperados para o sistema estudado em situações específicas e a inferência sobre possíveis comportamentos do sistema quando submetido a novas condições. Isto constitui uma importante vantagem sobre outros métodos de análise e favorece sobremaneira a sua utilização nos processos

decisórios sobretudo em questões que envolvam alta incerteza e vultuosos investimentos.

Por consequência, a simulação permite ultrapassar limitações dos modelos de resolução direta. É possível citar, por exemplo, vantagens do uso das simulações sobre os métodos de pesquisa operacional, pois, os casos de maior grau de complexidade podem ser ajustados caso a caso quando os métodos de simulação são empregados, e em geral, não se faz necessário lançar mão de hipóteses simplificadoras, como é usual nos métodos analíticos (SILVA, 2014; NABAIS, 2014)

A modelagem de sistemas pode ser feita de maneiras diferentes: teoria das filas e a teoria da simulação ou ainda uma composição dos dois métodos (PRADO, 2017).

Etapa 1: Construção do modelo de simulação

Etapa 2: Inclusão de alterações no modelo atual e analisar impactos sobre a situação

4.1.2 Características do modelo proposto

O modelo criado para este estudo foi criado pelo autor utilizando a linguagem de programação computacional *Visual Basic for Applications*. Os aspectos fundamentais abordados na seção 2.1.2 e relacionados ao capítulo 3 foram agregados no modelo para poder responder ao problema de pesquisa e aos objetivos elencados. Os principais aspectos considerados na simulação são enumerados a seguir:

- Plano operacional teórico: definido através da grade horária teórica planejada.
- Controle de disponibilidade de recursos produtivos: As viagens despachadas (realizadas) durante o processo de simulação estão restritas ao número máximo de composições disponíveis. Desta forma, uma viagem planejada só é liberada no horário programado se o controlador de trens possuir um veículo disponível no local e horário necessários.
- Disponibilidade dos recursos de infraestrutura e sinalização: Os veículos só podem realizar deslocamentos ao longo da rede de transporte se existir uma condição favorável para a circulação. O modelo proposto contempla a

delimitação do sistema em seções de bloqueio, emulando assim as lógicas internas de um sistema de intertravamento ferroviário;

- Demanda de passageiros: Considera a demanda realizada medida pelos sistemas de bilhetagem eletrônica e com base nestas informações faz a alocação dos passageiros primeiro nas plataformas das estações de acordo com o seu destino e posteriormente realiza a alocação deste passageiro em um dos trens que passe pelo ponto de embarque/desembarque e possua uma rota de circulação compatível com o interesse de viagem do cliente;
- Preferências de posição de embarque: Considera o carro preferencial para o embarque do passageiro, utilizando uma base de dados colhida dos sistemas de telemetria dos trens;
- Matriz Origem x Destino: Considera o local de desembarque dos clientes e desta forma capta aspectos relativos à taxa de renovação da oferta de lugares e proporciona a estimativa da taxa de ocupação interna dos carros do trem.
- Estimativa dinâmica do tempo necessário para o embarque dos passageiros: utiliza um método analítico proposto por Kunimatsu (2012) para estimar o tempo teórico necessário para realizar as operações de embarque e desembarque de passageiros nas estações considerando os parâmetros de demanda e origem x destino.

A seguir descreve-se em detalhes cada um destes aspectos considerados no processo de simulação.

4.1.2.1 Plano operacional teórico

O processo de simulação tem início com o carregamento de todos os objetos que serão utilizados durante o processo de simulação, a saber:

- Lista de viagens programadas;
- Seções de via (trechos)
- Linhas e trajetos planejados
- Seções de Bloqueio,
- Plataformas e sentido tráfego
- Tempos de viagem planejados

- Intervalo mínimo projetado por seção de bloqueio
- Total de trens disponíveis para execução do plano operacional

A grade horária planejada também é carregada em uma estrutura de filas para cada um dos terminais de onde são despachadas viagens: Pavuna (PVN), Uruguai (URI), Botafogo (BTF) e Jardim Oceânico (JOC), respeitando a delimitação temporal definida neste estudo.

O algoritmo é iniciado percorrendo a janela de tempo definida para a simulação de eventos discretos. O processamento das requisições para movimentação de veículos, despacho inicial das viagens ou deslocamento para a próxima estação, ocorre de maneira sequencial em ordem cronológica.

O headway mínimo planejado em cada uma das linhas que compõem o sistema de metrô do Rio de Janeiro é de 04min30seg, conforme limitações de capacidade instalada. Entretanto, existe um trecho de confluência entre as linhas 1 e 2 no trecho entre as estações Central e Botafogo o intervalo mínimo planejado para sistema é de 02min15seg, neste trecho. Desta forma, o algoritmo foi orientado para trabalhar com instantes de tempo de segundos para poder contemplar as características de intervalo mínimo do sistema, controlando assim o fluxo de movimentação dos veículos de maneira adequada.

A cada passo de interação do algoritmo são realizadas verificações se existem requisições de movimento de maneira planejada. Para verificar a viabilidade de atender a requisição de movimentação da viagem utilizou-se procedimentos de consulta do status do ativo ou entidade demandada (via entre estações ou via da plataforma da estação) e a disciplina FIFO (*First in - First Out*) para o atendimento da fila. Neste tipo de disciplina as primeiras requisições de atendimento são as primeiras a serem atendidas pelo sistema (FOGLIATTI; MATOS, 2007). No caso desta simulação as primeiras viagens com horários mais cedo são as que serão despachadas primeiro.

4.1.2.2 Disponibilidade dos recursos de infraestrutura e sinalização

O algoritmo utilizado na simulação também faz a verificação da existência de recursos para então poder despachar uma viagem. Esta verificação é feita de duas maneiras: a primeira é a verificação da disponibilidade do recurso de material rodante, este processo é mostrado na figura a seguir.

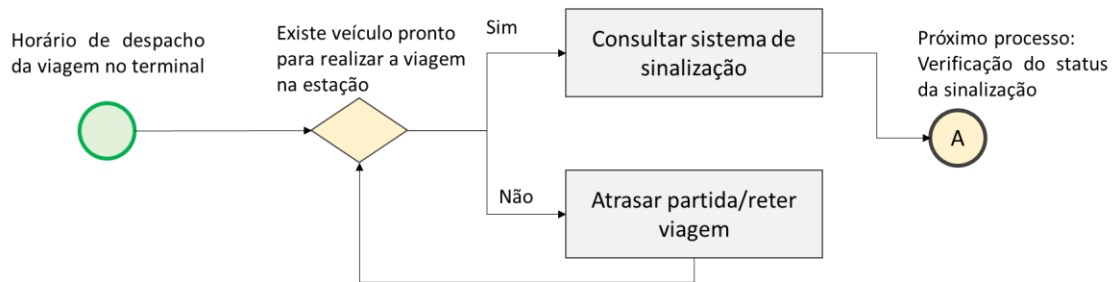


Figura 10 – Fluxo do processo para despachar viagens nas estações terminais.

O controle de disponibilidade de trens é feito por terminal de origem, assim no início da simulação é informado um parâmetro de trens disponíveis em cada um dos terminais de origem. Este parâmetro é o mesmo planejado na grade horária planejada. Caso não exista restrições de sinalização (sinal de partida fechado) e dos recursos disponíveis a viagem é despachada e o número de recursos de trens disponíveis neste terminal é decrescido em uma unidade. Caso exista ordem de despacho para a viagem, mas não exista trem disponível a viagem planejada é atrasada até o momento em que exista a disponibilidade do recurso.

A segunda verificação consiste em consultar a condição dos sistemas de sinalização. A via férrea contém sinais físicos e/ou virtuais que realizam o controle de ocupação das seções de bloqueio do sistema, conforme conceituado na seção 2.1.2. A disponibilidade de recursos de condutores não foi considerada para efeitos desta simulação. Adotou-se neste estudo a premissa de que sempre que existir um veículo disponível também haverá um condutor à disposição, ou seja, não haveria retenção de uma viagem por falta de condutores para o veículo.

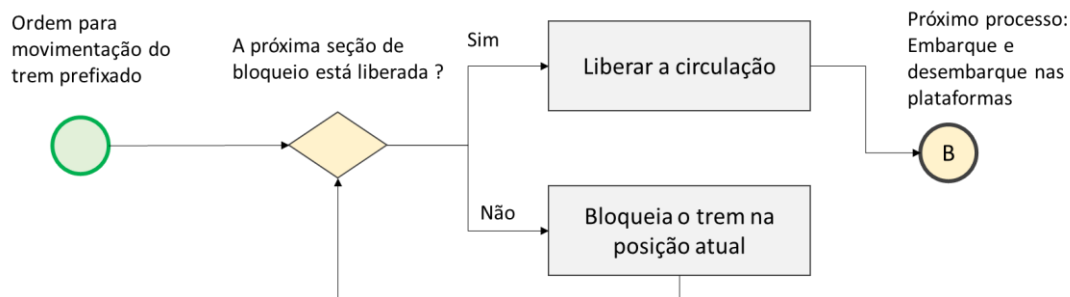


Figura 11 – Processo de liberação de uma viagem para estações intermediárias

Para o controle da sinalização foi adotada uma simplificação de que uma seção de bloqueio consiste no trecho de via intermediário entre a estação atual e a estação seguinte de um trem e o trecho de via delimitado pela plataforma da estação seguinte, exceto para os trechos onde o tempo de circulação entre duas estações é muito superior ao tempo mínimo da sinalização instalada, como é o caso do trecho Jardim Oceânico – São Conrado em que o tempo de viagem entre estações é pelo menos 3 vezes maior do que o tempo mínimo proporcionado pelo sistema de sinalização instalado. Neste caso o trecho foi seccionado em seções de bloqueios menores para representar o modelo de rede de forma mais adequada.

Assim, um veículo só pode ser despachado para a próxima estação se a próxima seção de bloqueio definida estiver totalmente liberada. Caso contrário, o veículo é retido no último local ocupado. Esta é uma simplificação razoável visto que não é adequado que os trens permaneçam parados em túneis fora de plataforma, inclusive por razões de contingência operacional e sensação de bem-estar do passageiro (AL-TEMEEMI; HARRIS,2004; ZHAO; KÜNZLI, 2016; FONTAINE, 2001).

4.1.2.3 Demanda de passageiros

Nesta etapa da simulação consideram-se os dados médios de entrada de passageiros para um dia útil, não se faz necessário processar os dados de entrada ao longo de todo dia operacional uma vez que a delimitação do estudo está orientada à análise dos períodos de maior demanda.

Os dados utilizados nesta etapa de cálculo são uma matriz de entrada de passageiros a cada hora em cada uma das estações do sistema e uma matriz de origem x destino para

os dias úteis que expressa o padrão dos desejos de deslocamentos dos passageiros a cada hora.

Houve uma simplificação quanto à distribuição de chegada dos passageiros mediante o uso da premissa que os passageiros chegam com uma distribuição uniforme ao longo de cada hora analisada. A periodicidade de atualização das chegadas dos passageiros nas plataformas foi de 1 minuto para igualar a taxa de atualização do despacho de trens que é simulada pelo modelo de computacional utilizado neste trabalho.

4.1.2.4 Matriz Origem x Destino

Com base na utilização da matriz origem e destino foi possível obter uma estimativa do número embarques e desembarques por sentido de circulação. Desta forma foi possível alocar os passageiros em plataformas de acordo com o sentido de viagem desejado e a ocupação interna dos veículos quando eles chegam na estação.

O método utilizado para apuração dos destinos de viagem foi a aplicação da matriz origem destino sobre o valor de passageiros entrantes no sistema. De acordo com o par origem destino foi estabelecido qual é o sentido de destino da viagem. Esta variável incorpora um importante fator à simulação, o índice de renovação da oferta de lugares. Este fator de renovação torna possível ofertar uma quantidade de lugares maior do que a nominal esperada quando uma viagem é despachada do terminal de origem. Por exemplo, quando o valor nominal de oferta gerada por uma viagem padrão no sistema é 1.800 lugares, todavia, se ao longo do trajeto houver um fator de renovação de 30% é possível ofertar uma quantidade superior de lugares e, na prática, atender uma maior quantidade de passageiros sob a mesma condição de nível de serviço.

Estes dados foram utilizados posteriormente para o cálculo mínimo do tempo de permanência do veículo na estação.

4.1.2.5 Preferências de posição de embarque

Outro fator que foi considerado durante a simulação foi a preferência do carro de embarque pelo passageiro. Este fator foi expresso da seguinte forma: sobre o número de passageiros entrantes, em uma dada estação e sentido de embarque, foi aplicado um

fator que reparte a demanda entre os seis carros do trem. Este fator de distribuição dos passageiros ao longo do trem foi obtido mediante o processamento de uma base de dados histórica da empresa que opera o sistema metroviário do Rio de Janeiro.

A metodologia utilizada para apurar a distribuição dos passageiros se baseou no sistema de telemetria instalado nos trens. Os trens mais modernos do metrô do Rio de Janeiro, fabricados pela CRRC, possuem um sistema de telemetria que monitora diversos componentes e eventos do trem. Para obter os dados utilizados neste estudo foi utilizado o fator de peso aferido para cada um dos carros.

Os registros destas informações podem ser recolhidos, posteriormente, do computador de bordo dos trens e sobre estes dados podem ser realizados processamentos para obter informações adicionais.

O metrô do Rio de Janeiro utiliza composições de 6 carros de passageiros que estão classificados de acordo com o seu layout interno em A, B ou C e de acordo com a posição de referência de das cabines de comando em Norte (N) e Sul (S). A metodologia utilizada para aferição do carro de preferência para o embarque empregou o peso de cada um dos carros durante todo o trajeto de uma viagem comercial (com passageiros diferença entre o peso aferido menos o peso carro vazio foi tomada como o peso total da carga de pessoas no interior do carro. Sobre o valor foi aplicado um valor de referência para transformar o peso aferido na carga estimada de pessoas dentro do carro.



Figura 12 – Exemplo do método de aferição da preferência dos carros pela lotação interna dos trens.

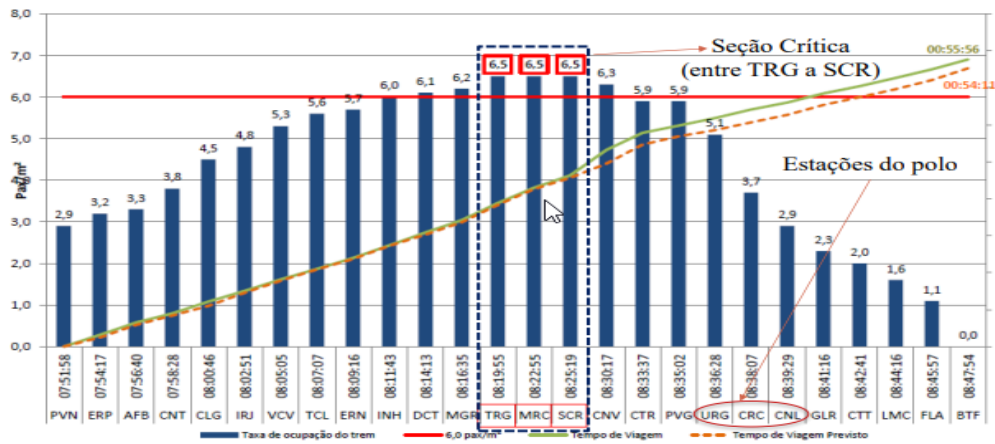


Figura 13 – Exemplo da quantificação da taxa de ocupação interna média de um trem, medida em passageiros por m², ao longo de uma viagem utilizando o sistema de processamento de dados da telemetria dos trens. Fonte: Andrade et.al (2019)

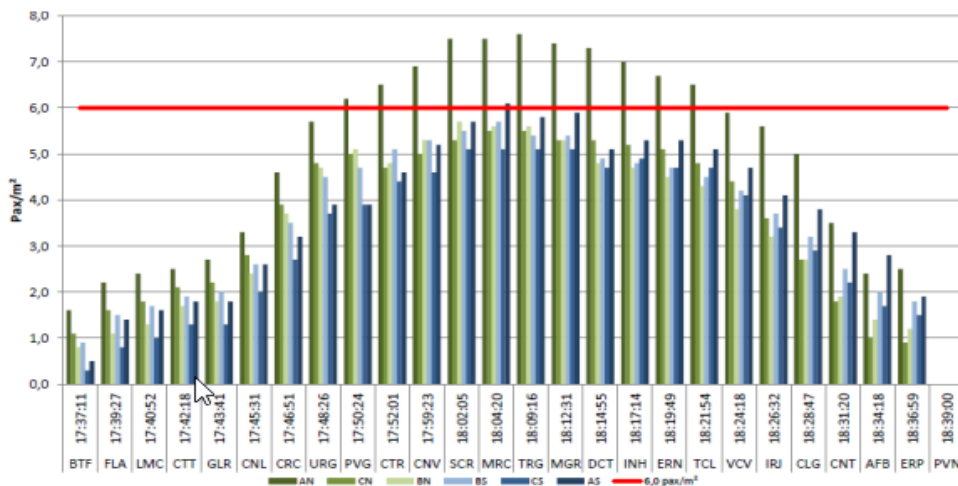


Figura 14 – Exemplo do resultado da mensuração da ocupação interna de cada um dos carros do trem, medida em passageiros por m², medida ao longo de uma viagem da operação comercial utilizando o sistema de processamento de dados da telemetria dos trens. Fonte: Andrade et.al (2019)

4.1.2.6 Cálculo do tempo mínimo de permanência em plataforma

Para calcular o tempo mínimo de permanência dos trens na plataforma foi utilizada uma função proposta no artigo escrito por Kunimatsu *et al.* (2012). Neste trabalho, os autores propuseram uma fórmula matemática que é produto de um modelo de regressão que considera as variáveis: total de embarques, desembarques e taxa interna de ocupação dos carros do trem, conforme descrito na equação a seguir.

$$Dwell_{i,p} = MAX_d \{ -0.34707 + 0.646497 \times on_{i,p,d} + 0.370068 \times off_{i,p,d} + 0.16291 \times (arr_{i,p,d} - off_{i,p,d}) \} \quad (3)$$

Onde:

Dwell é o tempo necessário para os passageiros embarcarem e/ou desembarcarem do trem *i* na porta *d* e estação *p* (medida em segundos). “*on*” é o número de pessoas que embarcam no trem *i*, na estação *p* e porta *d* do trem. “*off*” é a variável utilizada para expressar a quantidade de pessoas que desembarcam do trem *i*, na estação *p* e porta *d* do trem. Por fim, a variável “*arr*” quantifica o saldo de pessoas no interior do trem *i* na estação *p* e porta *d*.

A quantidade total de passageiros que embarcaram nos trens foi limitada até o valor máximo de carga possível, considerando a referência passada pelo fabricante dos trens. Trabalhou-se com dois possíveis níveis de lotação:

Nível 1: Capacidade total de assentos nos carros + Nível de conforto de 6 passageiros por metro quadrado de área interna útil dos carros do trem. Este nível é comumente utilizado como uma referência de nível de serviço considerado aceitável para os horários de pico.

Nível 2: Capacidade total de assentos nos carros + Nível de conforto de 8 passageiros por metro quadrado de área interna útil dos carros do trem. Este é o nível de lotação que considera o esgotamento total da capacidade interna do trem. O nível de 8 passageiros por metro quadrado é utilizado como uma referência de valor máximo de carga reportado pelos fabricantes dos trens desta estudados neste trabalho.

A função de Kunimatsu *et al.* (2012) foi utilizada como ponto de partida do modelo de simulação, porém, como trata-se de um valor estimado em um estudo conduzido em um país diferente do Brasil, considerou-se que muito provavelmente algum ajuste nos parâmetros da função poderia ser necessário. Este tipo de análise e os valores ajustados decorrentes serão apresentados na seção de análise de resultados.

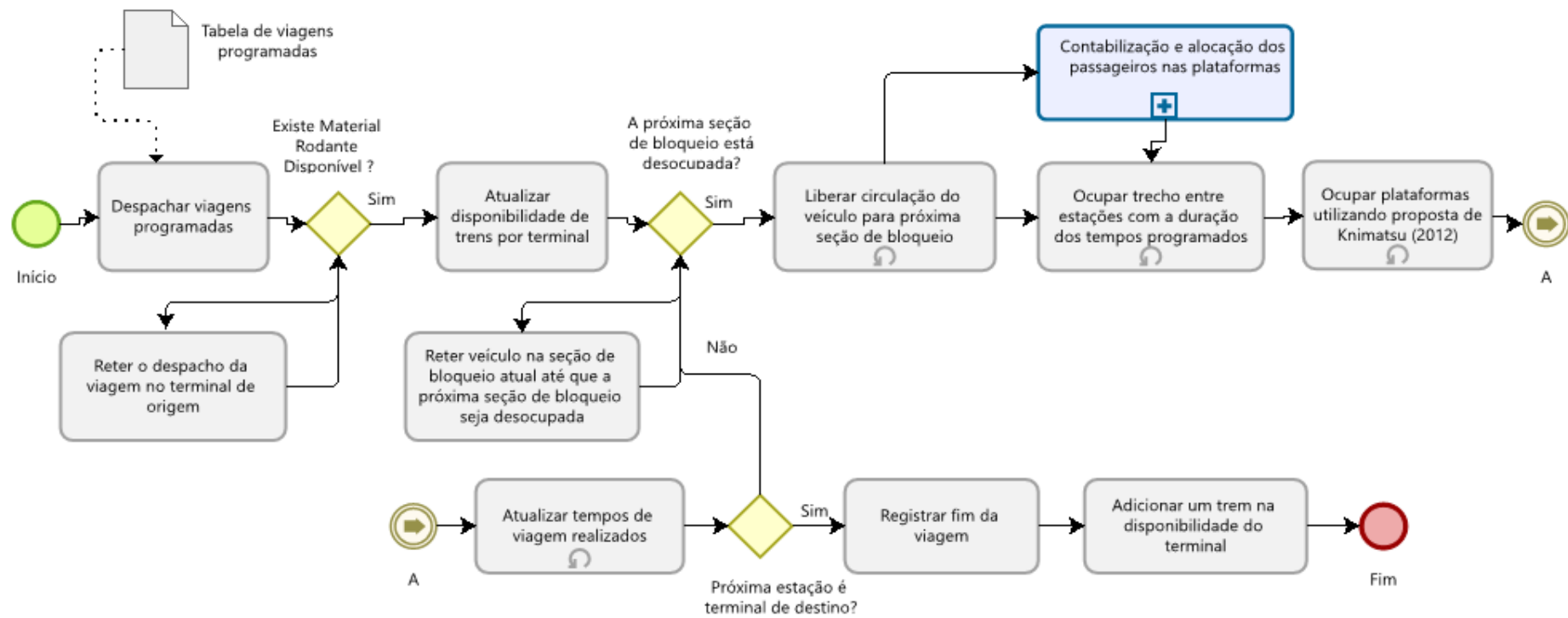


Figura 15- Fluxo do Processo do modelo aplicado na simulação

Por fim, os tempos simulados utilizando este modelo são comparados com as amostras de tempos realizados, que contemplou amostras dos horários das 05h00 às 09h30.

Os dados da amostra realizada foram tratados estatisticamente para retirada de *outliers* utilizando o método de Turkey, a partir dos interquartil entre o primeiro e terceiro quadrante da amostra de cada uma das plataformas e sentidos analisados. A partir desta técnica se definem os valores limites da amostra e os valores que estiverem fora do intervalo de amostragem delimitado são descartados como outliers (ROUSSEVEEUW; HUBERT ,2017)

A técnica utilizada para comparação dos tempos médios realizados e simulados foi o Teste de Hipótese t de Student para médias de duas amostras com tamanhos iguais e variâncias diferentes e outras análises estatísticas para comparação entre os valores das médias obtidas, conforme ilustra a imagem a seguir.

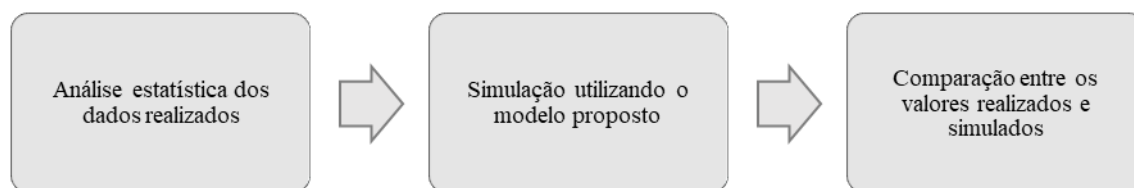


Figura 16 – Processo de Análise de resultados.

4.2 Materiais

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos com a contribuição do operador do sistema de metrô do Rio de Janeiro: perfil de demanda, preferências do uso dos carros, pesquisa de origem e destino dos passageiros e dados do plano operacional. Também foram utilizados dados públicos divulgados pelo agente regulador do serviço (AGETRANSP) e portais de dados da cidade do Rio de Janeiro, como o DataRio.

O período de levantamento dos dados englobou o período entre outubro e dezembro de 2019, último ano antes da pandemia do COVID-19, onde o nível de utilização do sistema atingiu valor máximo de passageiros transportados anual. Os dados foram delimitados para que o estudo contemple o período desde o início da operação comercial prevista até o horário de término programado para o pico da manhã dos dias úteis, às 09h30.

Foram analisados os registros de tempos de permanência em todas as plataformas do sistema, para todas as linhas e em ambos os sentidos de circulação dos veículos, exceto para as estações terminais, visto que os tempos de permanência nestes locais consideram outros fatores, como: tempos de manobra, tempos de troca de cabine etc.

As estações de regulação de intervalo, onde, os controladores de tráfego regulam o carrossel de trens, também foram desconsideradas neste estudo porque podem conter em seus tempos de plataforma realizados os tempos estratégicos de regulação, que não objeto de estudo deste trabalho.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Durante a aplicação do modelo e a realização das comparações de resultados foi possível observar que somente a fórmula de cálculo do tempo mínimo para parada nas plataformas não é suficiente para captar as necessidades do sistema de metrô do Rio de Janeiro e que, conforme inicialmente pensado, a equação para cálculo do tempo mínimo de permanência em plataforma deveria ser adaptada para melhor representar as características do metrô do Rio de Janeiro.

Os valores iniciais do modelo não convergiam de maneira adequada e foi necessário aprofundar os estudos destas possíveis causas dos desvios. As metodologias utilizadas para identificar e mensurar as lacunas observadas nos resultados preliminares foram:

- Visitas a campo para medição manual de tempos de paradas em estações.
- Entrevista de profissionais que trabalham no corpo técnico, na área operacional, do concessionário responsável pelo sistema.

Como resultado deste processo investigativo foram adicionados novos fatores à equação de cálculo do tempo mínimo de permanência para atender a demanda de passageiros que foi utilizada neste modelo de simulação:

1. Tempos técnicos médios para abertura e fechamento de portas: verificou-se em medições em campo, em algumas plataformas do sistema metroviário, que os tempos médios para abertura completa das portas após a parada nas estações é da ordem de 6,5 segundos. O uso deste tipo de tempo técnico também é recomendado pelo *US Transportation Research Board (TRB)* no manual de capacidade de trânsito e nível de serviço (TRB, 2013). Este tempo ocorre desde que o condutor do trem envia o comando de porta e engloba o tempo necessário para o áudio de aviso de abertura/fechamento de portas ser tocado completamente e o tempo para abertura/fechamento completo da porta.

2. Variabilidade do tempo de reação do condutor do trem para enviar o comando de abertura/fechamento de portas: Para simular diferentes tempos de reação e evitar valores únicos quando ocorrer baixa demanda, pois os valores tendem a ser sempre o mínimo valor possível.
3. Tempo mínimo de portas abertas: Valor de 6,5 segundos. Mesmo para os casos em que os valores de demanda (entradas, saídas) forem nulos será aplicado um valor mínimo de portas abertas de 6,5 segundos.
4. Penalidade para os fatores de cálculo quando o nível de conforto interno dos veículos ultrapassar o valor de 6 passageiros/m², na simulação. O valor ajustado para o modelo foi o incremento de 10% do valor calculado quando a lotação ultrapassou o valor de lotação nível 1. O valor de 10% foi utilizado como um ajuste linear que se observou quando comparada a resposta de simulação para viagens que alcançaram o nível 2 de ocupação.
5. Aplicação do valor mínimo de parada programado quando o tempo de parada calculado for menor do que o valor programado e o veículo não estiver atrasado na simulação. Estes ajustes foram aplicados porque o sistema do metrô do Rio de Janeiro possui uma tecnologia de piloto automático que faz com que o condutor do trem saiba qual é o momento de fechamento de portas programado, através de um equipamento que o orienta no marco dianteiro de parada do trem na plataforma.

Como resultado deste processo notou-se necessário aprimorar a equação supracitada para contemplar possíveis fatores geradores de discrepâncias entre os tempos de permanência realizados nas plataformas. A fórmula atualizada, que foi inserida no simulador, é ilustrada na equação a seguir.

$$Dwell_{i,p} = T_{técnico} + k * [MAX_d \{ -0.34707 + 0.646497 x on_{i,p,d} + 0.370068 x off_{i,p,d} + 0.16291 x (arr_{i,p,d} - off_{i,p,d}) \}] \quad (4)$$

Onde:

T (técnico) = É o tempo técnico necessário para abrir ou fechar completamente as portas dos trens. Neste modelo, este tempo inclui também o tempo necessário para concluir o anúncio interno para abertura das portas.

k = é um valor de penalização do tempo necessário para o embarque. Este valor assume o valor de 1 no modelo enquanto o nível de lotação interna simulado para o trem for menor ou igual ao valor de 6 passageiros por metro quadrado. Quando o nível de lotação simulado é alcança o nível 2, k assume o valor de 1.1

5.1 Resultados da comparação entre amostras realizadas x amostras simuladas.

Após ajustar a fórmula prevista para calcular o tempo mínimo de parada necessário e adaptar o cálculo de tempo de permanência no simulador utilizou-se o Teste t de Student bicaudal para médias com tamanhos iguais e variâncias diferentes. Este teste foi aplicado no software R Studio, passando como parâmetros de análise as amostras dos dados realizados e as amostras dos dados do tempo de permanência em plataforma calculados pelo simulador. Este teste foi utilizado para verificar se os valores médios do tempo de permanência dos trens nas plataformas que foram simulados pelo modelo são aderentes com os valores reais observados em campo.

Como resultado do teste obteve-se que não foi possível rejeitar a hipótese nula: que os tempos médios de parada realizados e os tempos médios de parada simulado são iguais entre si. Em 62% das plataformas simuladas o p-valor obtido para o teste com intervalo de confiança de 90% se situou dentro da faixa de aceitação, ou seja, os números médios do processo de simulação foram tais que não é possível afirmar que os valores médios das duas amostras são diferentes entre si. Assim, interpretou-se que para estes o processo de simulação foi capaz de projetar valores médios próximos daqueles que são observados na operação.

Entretanto, observou-se que a variância dos valores de tempo realizados foi maior do que o valor calculado no processo de simulação. É preciso analisar com maiores detalhes o que causa esta variabilidade e se existem aspectos comportamentais dos usuários do serviço ou ainda dos condutores dos trens que incidem sobre o tempo alterando-o. Entretanto, o valor médio observado para o período foi similar nos casos analisados. Os gráficos de Dispersão e Boxplot para as amostras analisadas

proporcionam uma visualização deste fenômeno. Estes gráficos estão dispostos nos anexos deste trabalho.

A semelhança entre os tempos médios realizados e os tempos simulados foi maior no sentido de Ida (67,8%), que é o sentido de maior demanda durante o horário do pico da manhã. Estes deslocamentos se referem às viagens que parte da Zona Norte para a Zona Sul do Rio de Janeiro. A Tabela 3 ilustra os resultados obtidos para uma simulação com uma demanda no patamar de 900.000 pessoas no sistema.

Tabela 3 – Tabela Resumo do comparativo dos tempos de permanência em estações realizados e simulados.

ESTACAO	SENTIDO	TEMPO MÉDIO REALIZADO	TEMPO MÉDIO SIMULADO	DIFERENÇA SEM MÓDULO (s)	DIFERENÇA COM MÓDULO (s)	TESTE T - MÉDIAS IGUAIS?
AQT	1	28	27	-1	1	SIM
JAH	1	27	27	0	0	SIM
NSP	1	27	27	0	0	SIM
GOS2	1	35	37	1	1	SIM
SCP	1	30	32	2	2	SIM
CAV	1	29	27	-2	2	SIM
LMC	1	30	32	2	2	SIM
CTT	1	27	27	0	0	SIM
GLR	1	27	27	0	0	SIM
CNL	1	31	32	0	0	SIM
CRC	1	38	37	-1	1	SIM
URG	1	32	32	0	0	SIM
PVG	1	29	29	0	0	SIM
ESA	1	34	32	-2	2	SIM
AFP	1	27	27	-1	1	SIM
SFX	1	27	27	0	0	SIM
SCR	1	43	36	-7	7	NÃO
MRC	1	37	40	2	2	SIM
TRG	1	38	42	5	5	NÃO
MGR	1	41	37	-5	5	NÃO
DCT	1	44	51	7	7	NÃO
INH	1	34	38	4	4	NÃO
ERN	1	36	38	2	2	SIM
TCL	1	30	33	3	3	NÃO
VCV	1	36	40	4	4	NÃO
IRJ	1	33	36	3	3	NÃO
CLG	1	30	35	5	5	NÃO
CNT	1	36	36	0	0	SIM
AQT	2	29	29	0	0	SIM
JAH	2	27	28	1	1	SIM
NSP	2	26	32	6	6	NÃO
GOS2	2	32	28	-4	4	NÃO
CTG	2	29	32	3	3	NÃO
SCP	2	27	31	4	4	NÃO
FLA	2	26	27	0	0	SIM
LMC	2	28	27	-1	1	SIM

CTT	2	26	27	1	1	SIM
GLR	2	28	27	-1	1	SIM
CNL	2	29	27	-2	2	SIM
CRC	2	38	29	-9	9	NÃO
URG	2	28	27	-1	1	SIM
PVG	2	26	27	1	1	SIM
POZ	2	26	32	6	6	NÃO
ESA	2	33	27	-6	6	NÃO
AFP	2	26	27	0	0	SIM
SCR	2	34	27	-7	7	NÃO
MRC	2	33	27	-6	6	NÃO
TRG	2	27	27	-1	1	SIM
MGR	2	34	27	-7	7	NÃO
DCT	2	29	27	-2	2	SIM
INH	2	27	32	4	4	NÃO
ERN	2	27	27	-1	1	SIM
TCL	2	28	27	-1	1	SIM
VCV	2	30	37	7	7	NÃO
IRJ	2	27	27	0	0	SIM
CLG	2	28	27	-1	1	SIM
CNT	2	30	27	-4	4	NÃO
CLG	2	27	27	0	0	SIM
CNT	2	29	27	-2	2	SIM

A média das diferenças em módulo foi de 2,52 segundos e sem módulo esta média foi de 0,04 segundos. Além da análise resumida destes valores é possível observar que os valores médios foram capazes de representar de maneira satisfatória o comportamento médio dos tempos realizados.

Notou-se, entretanto, que algumas estações analisadas apresentaram desvios maiores quando comparados os tempos médios simulados e realizados (ver gráficos do anexo). Para estes locais deve ser realizado um aprofundamento nos estudos de layout e ou taxa de chegada dos passageiros nas estações para tentar entender o fator responsável pelo comportamento atípico, quando comparado com as demais estações analisadas.

Cabe ressaltar que o modelo de simulação não abordou eventos de externalidade como retenção de portas. Outros fatores decorrentes de avarias, falhas ou ainda problemas com usuários, como atendimento ao usuário com mal-estar, também não foram incluídos neste modelo.

As Ilustrações a seguir mostram a diferença entre os valores simulados e realizados quando se considera medições discretas específicas. Foram colhidas amostras de dados

de permanência realizados e comparados par a par, segundo as horas do dia os valores de tempo de permanência simulados e os valores de permanência realizados.

Nestes gráficos é possível notar que os tempos de permanência realizados possuem uma variância maior do que os tempos simulados. Este fator pode ser explicado por uma limitação importante que este modelo encontrou por não trabalhar com a taxa de chegada dos passageiros na estação ajustada à frequência de passagem dos trens nas plataformas.

O intervalo simulado entre trens foi de 04min30s enquanto as informações de demanda estavam restritas a precisão de uma hora. Para a estratificação da demanda realizada em períodos menores utilizou-se uma distribuição uniforme. Aprimoramentos nos valores da taxa de chegada de pessoas nas plataformas para uma distribuição mais adequada podem gerar uma maior aderência ao modelo.

A seguir é mostrado, como exemplo, o resultado gráfico da comparação dos valores das amostras dos dados realizados e dos dados simulados. O resultado refere-se à estação Coelho Neto e os valores mensurados correspondem aos registros dos trens que circulam em sentido 1, com destino ao terminal Botafogo. O gráfico de dispersão, mostrado na figura 17, permite constatar uma grande variação tanto para os dados de permanência realizados quanto para os valores simulados. O valor do tempo médio de permanência mensurado em ambos os casos foi de 36 segundos, todavia, nota-se que em alguns casos, este valor pode não ser suficiente para realizar o serviço de embarque e desembarque de passageiros. Para cobrir este tipo de situação, geralmente, os planejadores utilizam uma técnica de distribuir tempos de regulação em pontos estratégicos da rede de transporte e nestes locais os veículos podem ficar paradas por mais tempo, para ajustar a cadência do carrossel de trens ou para recuperar pequenos atrasos, pela redução do tempo de parada planejado, quando a demanda assim permita, como afirma Yang *et al.* (2021).

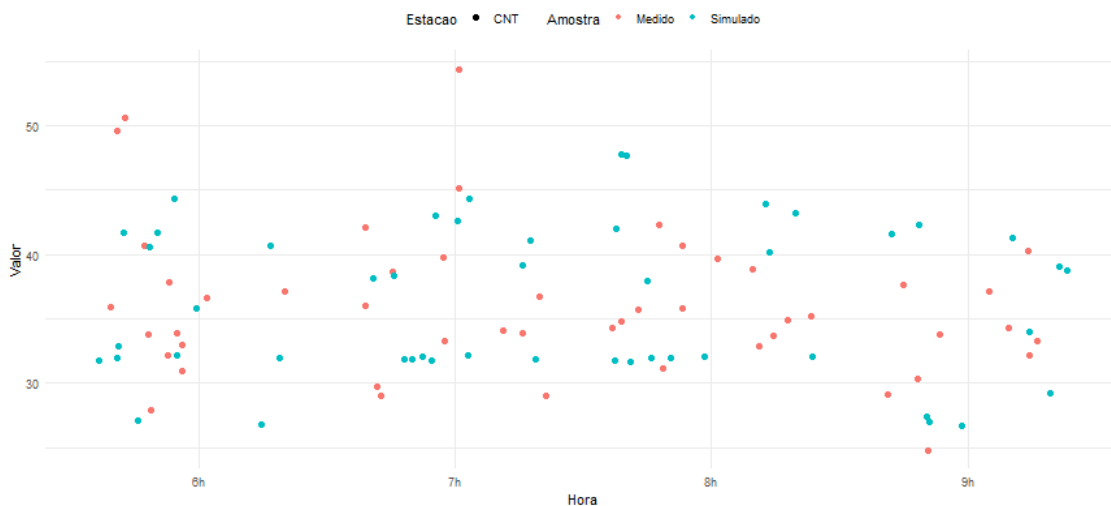


Figura 17 – Gráfico de dispersão para amostras de dados realizados e simulados na estação Coelho Neto, sentido 1.

O gráfico de Boxplot mostra o resultado da análise gráfica para as amostras realizadas e simuladas. Este valor refere-se ao período de pico da manhã, no sentido de circulação com destino à Zona Sul, que é o sentido com maior demanda registrada.

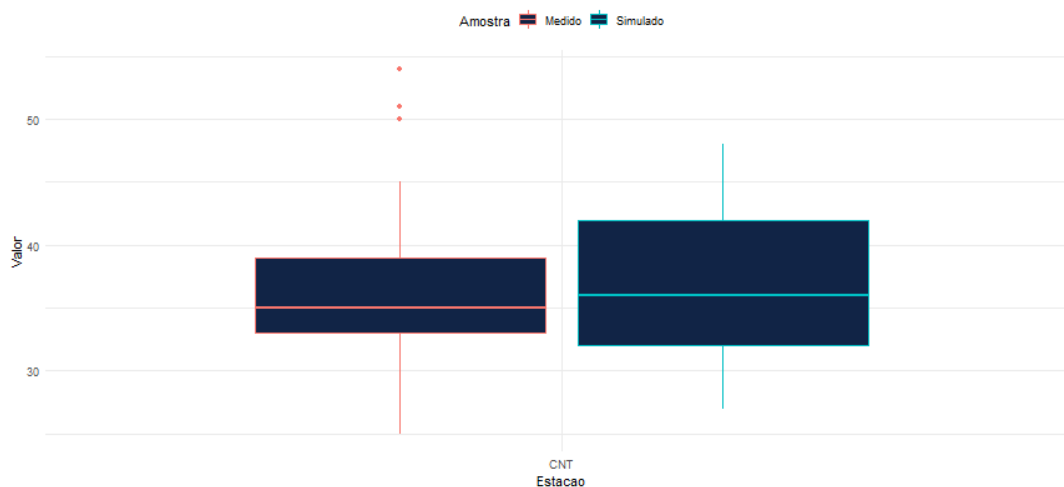


Figura 18 – Gráfico de Boxplot para a média das amostras de dados tempos de permanência em plataformas realizados e simulados na estação Coelho Neto, sentido 1.

O gráfico seguinte mostra a segregação dos dados dos tempos de permanência por hora. Nota-se que de acordo com a hora do dia os valores de mediana da amplitude dos valores registrados é diferente, todavia para uma operacionalização mais fácil do sistema o operador planeja os tempos de permanência dos trens em plataforma considerando de maneira agrupada para os trens que circulam durante o período de pico.

Assim todos utilizam o mesmo andamento, mantendo a regularidade e o tempo que estão separados entre si. Os resultados dos gráficos para as demais estações analisadas estão disponíveis nos anexos deste trabalho.

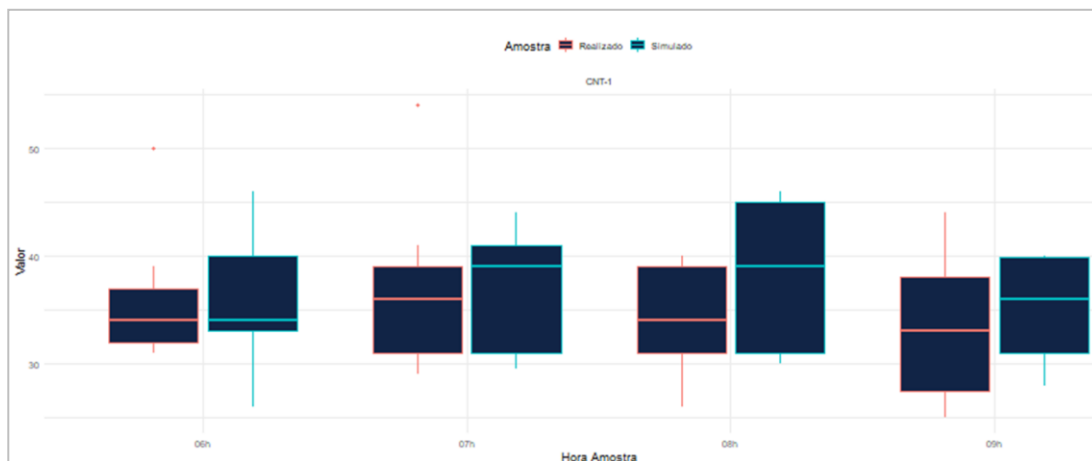


Figura 19 – Gráfico de Boxplot para a média das amostras de dados tempos de permanência em plataformas realizados e simulados na estação Coelho Neto, sentido 1 segregados por hora.

Outro fator importante para se notar é que a linha 2, que possui demanda maior que a linha 1. Das estações que somaram maior quantidade de atrasos em relação aos horários planejados, é possível notar que os maiores atrasos ocorrem nas estações da linha 2 e que as maiores lotações internas simuladas também ocorrem nas plataformas das estações desta linha, conforme pode ser observado na Tabela 3

Tabela 4 – Resumo das informações de atrasos e lotação estimadas no processo de simulação

Estação	Lotação máxima simulada	Tempo Médio realizado	Soma dos desvios realizados	Desvio Padrão do tempo de permanência
CTR_1	1997	50	1.138,43	10
MRC_1	2046	38	860,62	7
INH_1	2031	35	763,58	6
ERN_1	2018	34	686,62	6
VCV_1	1994	35	627,79	7
IRJ_1	1982	32	578,87	5
DCT_1	2044	49	528,88	8
TCL_1	2003	31	496,80	2
CLG_1	1967	30	449,15	3
CNV_1	2005	33	446,31	2
SCP_2	1127	30	436,76	4
CNT_1	1913	32	432,53	6
ERP_1	1783	30	395,66	4

AFB_1	1897	30	395,46	3
TRG_1	2052	41	385,01	5
PVG_1	2010	30	351,77	2
AQT_2	1352	29	350,17	3
URG_1	2022	33	338,46	2
CTR_2	430	27	334,63	1
LMC_2	961	27	330,78	1
FLA_2	997	27	327,84	1
JAH_2	1284	28	288,94	2
FLA_1	1589	28	287,83	2
GOS_2	1124	28	282,99	2
CTT_1	1620	27	249,21	2
GLR_1	1598	27	242,48	1
SCR_1	2035	34	234,65	2
LMC_1	1606	32	217,20	1
ERN_2	373	27	210,00	1
CRC_1	1863	37	209,80	1
ESA_2	612	27	208,00	0
AFP_2	630	27	206,00	1
SCO_1	429	27	205,00	1
CNL_2	848	27	203,00	1
SPN_2	396	27	202,00	1
SFX_2	554	27	200,00	1
GLR_2	866	27	199,00	1
CTT_2	888	27	197,00	1
PVG_2	446	27	196,00	1
CNL_1	1712	32	193,68	1
CRC_2	756	29	193,00	3
URG_2	569	27	187,00	1
CAV_2	1101	28	171,71	2
CAV_1	1489	27	118,81	1
NSP_2	1225	32	113,29	1
ESA_1	888	32	110,00	1
POZ_1	936	27	109,00	0
SPN_1	372	37	107,00	0
AFP_1	840	27	106,00	1
CNV_2	220	32	105,00	1
MGR_1	1963	37	104,00	0
SCR_2	253	27	103,00	1
SCP_1	1397	32	102,69	1
MGR_2	274	27	101,00	1
INH_2	356	32	101,00	1
SCO_2	993	32	100,00	1
SFX_1	780	27	99,00	1
TRG_2	248	27	99,00	1
MRC_2	222	27	99,00	1
GOS_1	1062	37	98,00	1
CTG_2	1134	32	97,34	1
IRJ_2	450	27	97,00	0
NSP_1	930	27	96,91	0
JAH_1	742	27	96,00	1
CLG_2	445	27	95,00	1
TCL_2	390	27	94,00	1

AFB_2	307	27	92,00	1
VCV_2	417	37	92,00	1
DCT_2	327	27	91,00	1
AQT_1	545	27	89,00	1
ERP_2	266	27	86,00	1
POZ_2	664	32	84,00	1
CNT_2	419	27	82,00	1

Estes atrasos também podem ser visualizados no gráfico de circulação que compara os dados da grade horária planejada x a circulação simulada pelo modelo. Este gráfico é uma das saídas do simulador. Os horários planejados estão representados por linhas pontilhadas, enquanto os horários realizados são representados por linhas contínuas que possuem a mesma cor da sua viagem planejada.

É possível notar que no modelo de simulação as viagens já chegam ao ponto convergência das linhas com um desvio (atraso) considerável. Este tipo de evento pode fazer com que o trem fique retido na estação aguardando uma faixa horária para circulação, pois o veículo pode ter chegado ao ponto de junção das linhas em uma faixa que estava reservada para a linha 1, segundo a grade horária planejada.

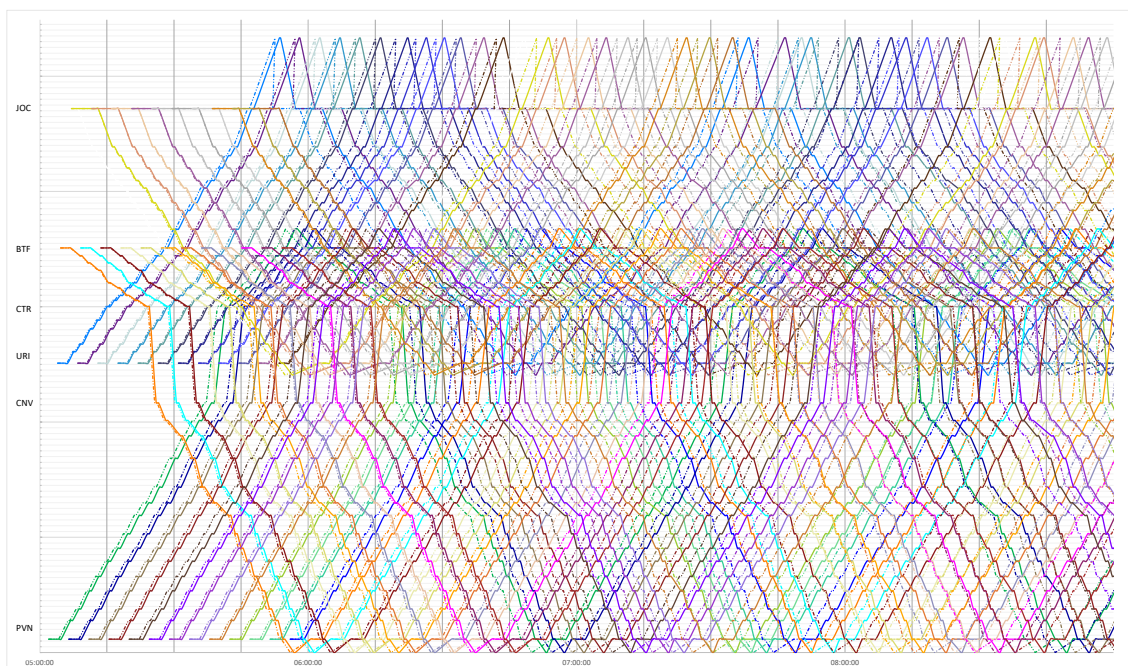


Figura 20 – Gráfico de circulação planejada x circulação simulada

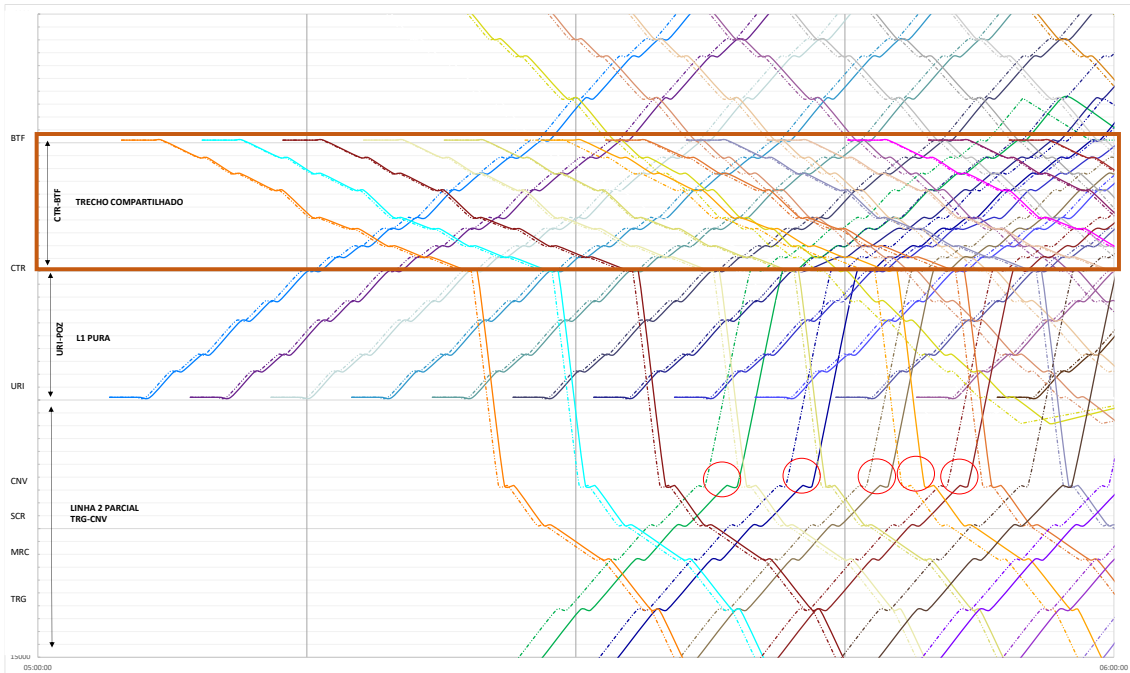


Figura 21 – Visualização dos atrasos simulados e da junção das duas linhas no trecho compartilhado.

5.2 Projeção do impacto da variação de demanda sobre os indicadores de desempenho

Após verificar se o modelo proposto possui capacidade para representar adequadamente os tempos de parada nas plataformas, foi conduzida uma simulação para verificar qual seria o impacto da variação do número de passageiros no sistema sobre o indicador que mede o índice de cumprimento das viagens programadas.

Os resultados obtidos são mostrados na tabela a seguir. Nota-se que o simulador prevê uma redução no nível de performance quando o número de passageiros no sistema é maior, ratificando a relação de correlação entre estas duas variáveis. Estes valores são compatíveis com o perfil de desempenho observado no estudo de Viana et. Al (2020).

Tabela 5 - Comparação dos indicadores de desempenho simulados para diferentes patamares de demanda.

SIMULADO PATAMAR PASSAGEIROS ANTES DO COVID-19			SIMULADO PATAMAR PASSAGEIROS DURANTE FASE INICIAL DO COVID-19		
LINHA	SENTIDO	VIAGENS REALIZADAS	LINHA	SENTIDO	VIAGENS REALIZADAS
L1/L4	VIA 1 - IDA	98,33%	L1/L4	VIA 1 - IDA	100,00%
	VIA 2 - VOLTA	96,67%		VIA 2 - VOLTA	98,33%
L2	VIA 1 - IDA	96,72%	L2	VIA 1 - IDA	100,00%
	VIA 2 - VOLTA	96,67%		VIA 2 - VOLTA	100,00%

Tabela 6 - Valor de desempenho simulado para diferentes patamares de demanda.

SIMULAÇÃO DO INDICADOR DE CUMPRIMENTO DE VIAGENS			
ANTES DA PANDEMIA (PATAMAR ACIMA DE 900k PASSAGEIROS POR DIA ÚTIL)	97,10%	DURANTE FASE INICIAL DA PANDEMIA (PATAMAR ABAIXO DE 200k PASSAGEIROS POR DIA ÚTIL)	99,58%

Muito embora o fator demanda impacte o desempenho operacional dificultando o atingimento dos níveis de serviço ao cliente, com alta disponibilidade, regularidade e pontualidade do serviço, a solução para manter um alto nível de serviço não deve ser obtida pela redução de passageiros no sistema, visto que a natureza do serviço público é disponibilizar o maior nível de acessibilidade possível e não o reduzir.

Em situações normais, realizar este tipo de testes no sistema seria muito difícil, visto que o sistema de metrô do Rio de Janeiro passou a fazer cada vez mais parte da dinâmica de deslocamento dos cariocas ao longo dos anos, como mostrado na figura 2. Entretanto, o nível da redução de demanda imposta pelo período pandêmico proporcionou um ambiente em que este tipo de comparação pode ser realizado.

Como foi exposto neste trabalho, o sistema de metrô do Rio de Janeiro atualmente possui a característica de operar muito próximo ao limite de sinalização atualmente instalado. O trecho compreendido entre as estações Central e Botafogo opera,

atualmente, nos horários de pico, com intervalos entre trens de 02min15s (135 segundos), pois neste ponto ocorre a junção dos serviços de linha 1 e linha 2 que operam com intervalos de 04min30s cada.

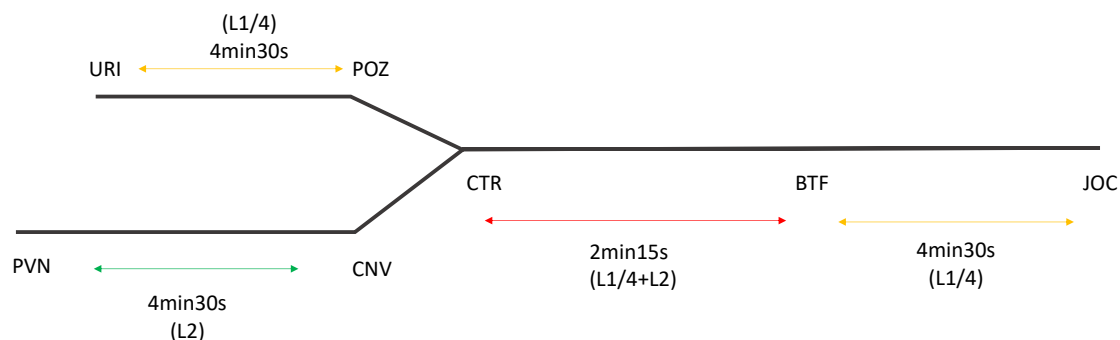


Figura 22 - Ilustração esquemática de junção das linhas e dos intervalos planejados. Sugestões para investimento

Diante da limitação demonstrada e dos desafios decorrentes do aumento da demanda é necessário aplicar investimentos ou estratégias que possibilitem uma condição de equalização dos volumes de oferta x demanda para possibilitar um nível de serviço adequado para o sistema. Esta equalização pode ser conduzida de múltiplas formas. Como contribuição deste estudo serão indicadas três ações possíveis:

1. Estratégias de distribuição da demanda: Utilizar estratégias para incentivar a distribuição da demanda dos passageiros tal como mencionado nos estudos de Zheng et. Al (2014), Eran e Dick (2009) e Nan e Ling (2017). Estes autores analisaram o aspecto da concessão de incentivos aos usuários do sistema de transporte para utilizarem os serviços fora dos horários de maior demanda. Este incentivo foi testado por pela redução da tarifa nos horários fora dos horários de pico.

Esta, no entanto, é uma solução que pode envolver transformações sociais mais amplas como o escalonamento dos horários de entrada nos postos de trabalho e outros tipos de serviços como escolas, creches etc. Este tipo de técnica foi utilizado no período de pandemia do COVID-19 onde foi feito um escalonamento do horário de funcionamento de alguns setores da economia,

visando reduzir os valores máximos de lotação do transporte público, por exemplo.

2. Investimentos em novas tecnologias para o sistema de sinalização instalada: Projetos de investimento para implantação de um sistema de sinalização mais moderno, tais como os sistemas de tecnologia CBTC, onde as seções de bloqueio são definidas por blocos de controle móveis e virtuais. Este tipo de tecnologia poderia proporcionar uma redução do *headway* mínimo executável. Com este tipo de tecnologia os intervalos mínimos poderiam ser reduzidos 60-90 segundos, por exemplo. Todavia realizar intervenções de engenharia para adaptação do sistema de metrô que já opera não é uma tarefa simples, sobretudo porque o metrô do Rio de Janeiro possui uma pequena faixa horária de tempo para realizar as manutenções de infraestrutura. Esta faixa horária atualmente começa às 01h00 e se encerra às 04h00. Esta pequena faixa horária para realizar as atividades pode contribuir para que o projeto tenha uma duração muito grande e, conseqüentemente, custo muito maiores se comparado com as situações ideais para realizar o projeto de adaptação.

3. Investimento para expansão da linha 2: Executar investimento para expansão da linha 2 desde a estação Estácio até a Estação Carioca com duas vias subterrâneas separadas do trajeto atual. Conforme previsto na primeira cláusula do contrato de concessão §3º item d. Esta opção criaria um caminho de circulação para linha 2 e isto possibilitaria a geração do dobro da oferta no trecho Estácio - Carioca. Tendo em vista que parte do trabalho de escavação já foi realizado, muito embora é necessário realizar intervenções de engenharia e aquisição de sistemas e infraestrutura. Este é um projeto que contaria com maior disponibilidade de tempo e a execução das obras poderia, em muitos momentos, ocorrer paralelamente com a operação comercial já existente.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho utilizou um modelo de simulação computacional que foi criado a partir do estudo bibliográfico do fenômeno de atrasos em sistemas metroferroviários com o objetivo de analisar se existem evidências científicas para a aceitação da hipótese inicial de que existe uma relação de causalidade entre o aumento do número de passageiros transportados e a redução do desempenho operacional do sistema de metrô do Rio de Janeiro.

A investigação do problema utilizou dois caminhos exploratórios. Primeiramente, uma pesquisa bibliográfica buscou confirmar ou refutar a hipótese inicialmente considerada: que o aumento da demanda de passageiros pode impactar a regularidade do serviço para sistemas que operam em um regime de intervalos muito próximo ao limite de capacidade instalada para o sistema.

Os resultados obtidos na pesquisa bibliográfica confirmaram o fator demanda e suas componentes (fluxos de entrada, saída e lotação interna dos veículos) como o fator com maior potencial para impactar a regularidade operacional, confirmando a hipótese inicial. Os trabalhos avaliados também indicaram que a maioria dos casos de atraso são gerados nas plataformas durante as operações para entrada e saída de passageiros dos trens.

A segunda vertente utilizada foi o estudo do fenômeno do aumento da demanda e a observação dos seus impactos no sistema de transporte. Este tipo de análise foi possibilitado pela criação um modelo de simulação elaborado pelo autor em linguagem de programação *Visual Basic for Applications*. Este modelo foi elaborado para possibilitar estimação dos tempos de permanência dos veículos nas plataformas e o seu impacto sobre a geração de atrasos e na perda da regularidade do serviço prestado. O modelo utilizou as principais variáveis independentes que foram apontadas majoritariamente como as mais relevantes para a geração de variabilidade nos tempos de viagem pelos autores considerados na pesquisa bibliográfica deste trabalho.

O modelo de simulação utilizado incluiu outras variáveis, além do valor da demanda, tais como: intervalo mínimo proporcionado pelo sistema de sinalização, as preferências de carro de embarque e diferentes níveis de lotação no interior dos veículos e os tempos limites da sinalização instalada. É importante ressaltar que o sistema de metrô do Rio de Janeiro possui uma característica importante e que o diferencia de outros metrôs, como o metrô de São Paulo: o compartilhamento da infraestrutura viária pelas linhas.

As linhas 1/4 e 2 se unificam no trecho entre a estação Central e Botafogo provoca perturbações operacionais de uma linha tenham impacto direto na operação e na regularidade da outra linha. Inicialmente, em termos contratuais, a linha 2 deveria ter um traçado menor, possuindo as estações terminais Pavuna-Estácio. Todavia, devido à alta demanda para o serviço para a linha 2, as características de desejo de viagem majoritariamente para a região do Centro e Zona Sul foi necessário reconfigurar a rede para atender melhor os interesses dos usuários do sistema de metrô do Rio de Janeiro.

O modelo de simulação foi criado para representar o comportamento das viagens programadas em função de uma demanda realizada durante o horário de pico da manhã para todo o sistema do metrô do Rio de Janeiro, tanto da linha Pavuna-Botafogo quanto da linha Uruguai-Jardim Oceânico de maneira simultânea, possibilitando identificar os desvios em relação aos valores programados em grade horária e o impacto mútuos da ocorrência de atrasos em uma das linhas.

A validação dos valores de saída do modelo foi feita pela comparação entre os tempos médios de permanência realizados e os valores calculados no processo de simulação. Utilizou-se o Teste t de Student para médias com variâncias diferentes e com um intervalo de confiança de 90% para analisar a capacidade do modelo em simular corretamente os valores médios de tempo de permanência dos trens em plataforma que são necessários para atender a um determinado nível de demanda.

Os resultados do modelo de simulação mostraram que ele foi capaz de representar um comportamento médio dos tempos de permanência dos trens nas plataformas em mais de 62% das plataformas de estações estudadas. Nestes casos não foi possível rejeitar a

hipótese de que existe uma diferença entre os valores das médias realizadas e os valores das médias simuladas.

O modelo de simulação também mostrou que investimentos em redução do tempo sinalização ou da criação de trechos alternativos de tráfego na região Central poderiam aumentar a capacidade de oferta e aumentar a regularidade do serviço e os níveis de serviço ao usuário. Dentre estes projetos possíveis poderia ser viabilizada a expansão da linha 2 até a estação Carioca com circulação por trecho próprio entre as estações de Estácio e Carioca. Este investimento já foi previsto no contrato de concessão e já possui o trecho escavado, muito embora, muitos investimentos tenham que ser realizados para ativar este trecho de operação, além do mais seria necessário reconsiderar o trajeto atual, e a estação Cidade Nova deixaria de ser atendida por todos os trens que circulam na linha 2, pois esta estação atualmente não possui conexão com o traçado de expansão inicialmente planejado.

Os resultados apresentados neste trabalho podem servir para referenciar estudos tanto para os órgãos reguladores e/ou poderes concedentes (Poder Público) e para operadores de um sistema de metrô. Para o Poder Público a aplicação dos métodos aqui expostos pode possibilitar uma análise da capacidade máxima operacional de um sistema sob um nível de serviço pré-estabelecido. Esta análise pode orientar as decisões de investimentos para criação, expansão ou melhorias no sistema projetado.

Para os operadores, as técnicas aqui mostradas podem auxiliar na simulação de tempos de viagem mais adequados e na análise de estratégias operacionais para ajustar o modelo operacional visando um maior nível de regularidade mediante a redução de atrasos. Estas estratégias podem incluir, por exemplo, ações de comunicação e direcionamento de fluxo dos passageiros na estação, controle de fluxo nas catracas ou nas plataformas com portas automáticas etc. Além dos aspectos operacionais, este tipo de simulação pode ajudar os operadores do sistema nas revisões contratuais e dos níveis de serviço definidos em contrato, visto que, para níveis de lotação muito altos o nível de serviço medido pelos indicadores operacionais tende a serem reduzidos. Desta forma, é possível encontrar um valor de nível de serviço mais justo e alcançável, evitando assim penalizações decorrentes do não atingimento de níveis de serviço que desconsideram a realidade de esgotamento dos recursos e possibilidades do sistema.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se um refinamento do modelo atual, utilizando uma distribuição de chegada mais apurada para expressar melhor a esperança de chegada dos clientes em cada uma das estações do sistema e assim, poder representar com maior precisão os eventos que ocorrem no sistema ou ainda a incorporação de estimativas da variabilidade dos tempos de embarque gerados por um comportamento ou estado dos usuários do sistema.

6.1 Limitações e recomendações para trabalhos futuros

Apesar do modelo de simulação utilizado neste trabalho apresentar uma representação de fatores que influenciam nos eventos associados a permanência dos trens nas plataformas, ele também possui algumas limitações. Por limitações de tempo e disponibilidade de informações este trabalho limitou-se a analisar os aspectos de atrasos gerados pelo fator demanda pois eles são capazes de captar boa parte das variações realizadas. Entretanto, existem outras variáveis que possam ser consideradas para estimativas de atrasos mais refinadas, tais como layouts internos de cada estação, layout interno dos veículos etc.

Os valores da demanda disponibilizados por estação estavam agrupados por hora. Isto impossibilitou a representação mais fiel da taxa de chegada dos passageiros durante uma hora. Utilizou-se a simplificação de que a taxa de chegada dentro da hora é uniforme o que não representa o comportamento do sistema. O sistema de metrô do Rio de Janeiro atualmente possui dois tipos de frota em operação: os trens da série Alstom/Mafersa e os trens CRRC. Neste trabalho, os tempos técnicos utilizados para abertura e fechamento de porta foram considerados iguais para todos os veículos.

Outra limitação importante consiste no fato de externalidades decorrentes de impedimentos intencionais de portas ou ainda impedimento não intencionais, por dificuldades de acessar o interior do veículo ou chegada às portas em momento do seu fechamento não foram modeladas neste trabalho. Atrasos causados por ocorrências relacionadas ao atendimento de passageiros com mal-estar ou ainda outras situações,

como queda de objetos na via, que afetem a operação também não foram considerados. Este seria um aprofundamento interessante porque com o aumento do número de pessoas no sistema aumenta a probabilidade destes tipos de ocorrência que são decorrentes do comportamento dos passageiros e da sua interação com as instalações do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-TEMEEMI, A., HARRIS, D., 2004. A guideline for assessing the suitability of earth-sheltered mass-housing in hot-arid climates. *Energy Build.* 36 (3),251–260.
- AMICCI, A. G. N. *et al.* Guia TPC: orientações para seleção de tecnologias e implementação de projetos de transporte público coletivo. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2018.
- ANDRADE, C.E.S; D'AGOSTO, Márcio; SOUZA, A.S.M. O controle do desempenho do atributo conforto em metrô. In: 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes,2019.
- ANTPRILHOS. MetrôRio: 40 anos de parceria com o carioca. Disponível em: <<https://anprilhos.org.br/metrorio-40-anos-de-parceria-com-o-carioca/>>. Acesso em: 8 mar. 2021.
- ARELLANO, M. Panel data econometrics. Oxford university press, 2003.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V. A.; MORABITO, R.; YANASSE, H. H. Pesquisa operacional. Rio de Janeiro: Campus/elsevier, 2007.
- AZÉMA, M. “Der Reiszug” Festung Hohensalzburg Salzburg, Austria.. Paris,France, Funimag. , 1997
- BABABEIK, M; ZERGUINI, S,FARJAD-AMIN, M. ,KHADEMI, N. ,BAGHERI, M. Developing a train timetable according to track maintenance plans: A stochastic optimization of buffer time schedules,Transportation Research Procedia,Volume 37,2019,Pages 27-34,ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.162>.
- BRAGA, VANDERLEI, CASTILHO, R. Plano Diretor De Desenvolvimento Dos Transportes (Pddt-Vivo) E Planejamento Logístico De São Paulo. Mercator: Revista de Geografia da UFC, v. 5, n. 10, p. 15–30, 2006.
- BRAGA, R. Política urbana e gestão ambiental: considerações sobre o plano diretor e o zoneamento urbano. *Perspectivas de Gestão Ambiental em Cidades Médias*, n. Tabela 1, p. 95–109, 2001.
- BRAGE-Ardao, R., GRAHAM, D. J., & Anderson, R. J. (2014). Determinants of Train Service Costs in Metro Operations. *Transportation Research*

- BUCHMULLER, S., WEIDMANN, U., NASH, A. Development of a dwell time calculation model for timetable planning”. Institute for Transport Planning and Systems. Anais...Switzerland: Comrail XI 525, 2008a
- BUDIONO, Oktiani. Customer Satisfaction in Public Bus Transport : A study of travelers' perception in Indonesia., 2009.
- CARVALHO, A. R. DE. Contribuição para a Determinação da Capacidade de Vias Ferroviárias. [s.l.] UFRJ, 2019.
- CEDER A., Hassold S., Applied analysis for improving rail-network operations, Journal of Rail Transport Planning & Management, Volume 5, Issue 2, 2015, Pages 50-63.
- CHRISTOFOROU, Z., CHANDAKAS, E. & KAPARIAS, I. Investigating the Impact of Dwell Time on the Reliability of Urban Light Rail Operations. Urban Rail Transit 6, 116–131 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40864-020-00128-1>
- CNT. Transporte metroferroviário de passageiros. Transporte & Desenvolvimento. Brasília, 2016. Disponível em: <https://cnt.org.br/transporte-metroferroviario-de-passageiros>. Acessado em 12 mar. 2022
- CORMAN, F.; D’ARIANO, A.; HANSEN, I. A. Evaluating Disturbance Robustness of Railway Schedules. Journal of Intelligent Transportation Systems, v. 18, n. 1, p. 106–120, 2 jan. 2014.
- CORNET S, Buisson C, RAMOND F, BOUVAREL P (2019) Methods for quantitative assessment of passenger flow influence on train dwell time in dense traffic areas. Transp Res Part C 106:345–359
- CURRIE, G., DELBOSC, A., GELFAND, S., SARVI, M., 2013. Exploring the impact of crowding and stop design on streetcar dwell time. In: Paper Presented at the Transportation Research Board 92nd. Annual Meeting, Washington, D.C.
- DAAMEN, W., LEE, Y., W. P. Boarding and alighting experiments: Overview of setup and performance and some preliminary results. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2042, p. 71–81, 2008.
- DATARIO. Total de linhas, frota operante, passageiros transportados, viagens realizadas, quilometragem coberta, combustível utilizado e pessoal ocupado pelo sistema de ônibus no Município do Rio de Janeiro entre 1984-2020. Disponível em: <https://www.data.rio/documents/c09ef8f7d5de472c8624639070d97868/about>. Acessado em 02 mar. 2022.

- DONG LIN, JOHN D. NELSON, MARK BEECROFT A, J. C. C. An overview of recent developments in China's metro systems. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, v. 107, n. February 2020, p. 103658, 2021.
- ELISABETE, B.; BELCHIOR, M. Modelo de análise da viabilidade financeira de investimento em ferrovias. p. 2–55, 2018.
- ERAN B., DICK E., Carrots versus sticks: Rewarding commuters for avoiding the rush-hour—a study of willingness to participate, *Transport Policy*, Volume 16, Issue 2, 2009, Pages 68-76, ISSN 0967-070X, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2009.03.005>.
- FARD, H. R. Urbanization and informal settlement challenges: Case study Tehran metropolitan city. v. *Open House*, n. *Open House International*, 43(2), 77-82, 2018.
- FARIAS, A. R. *et al.* Identificação, mapeamento e quantificação das áreas urbanas do Brasil. *Embrapa Gestão Territorial*, v. 4, n. May, p. 5, 2017.
- FAULHABER, L.; NACIF, C. L. Reforço Do Padrão De Organização Espacial Centro-Periferia. p. 1–17, 2014.
- FOGLIATTI, M. C. N. M. C. M. *Teoria de filas*. Rio de Janeiro, Interciência, 2007.
- FONTAINE, S., 2001. Spatial cognition and the processing of verticality in underground environments. *Int. Conf. Spatial Inf. Theory* 387–399.
- FREMDLING, Rainer. "European Railways 1825-2001, an Overview" *Jahrbuch für Wirtschaftsgeschichte / Economic History Yearbook*, vol. 44, no. 1, 2003, pp. 209-221. <https://doi.org/10.1524/jbwg.2003.44.1.209>
- GIBSON, S., COOPER, G., BALL, B., 2002. Developments in transport policy: the evolution of capacity charges on the UK rail network. *Journal of Transport Economics and Policy* 36 (2), 341–354
- GUJARATI, DAMODAR N., E D. C. P. *Econometria básica*. 5. ed. New York: Mc Graw Hill, 2011.
- GUJARATI, D. N. *Econometria Básica*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.
- GYLEE, M., 1994. Punctuality analyses—a basis for monitoring and investment in a liberalized railway systems. *Proceedings of Seminars held at the 22nd European Transport Conference P384* (9), 153–165.

- HABITAT, O. Estado de las ciudades de América Latina y el Caribe 2012. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos, n. 17, p. 124, 2012.
- HANSEN, I.A. (2001). "Improving Railway Punctuality by Automatic Piloting", IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings, 792-797.
- HARRIS, N. G. Train boarding and alighting rates at high passenger loads. Journal of advanced Transportation, v. 40(3), p. 249–263, 2006.
- HEINZ, W. Passenger Service Times on Trains—Theory, Measurements and Models. [s.l.] Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003.
- HILTON, S. The grand experiment: the birth of the railway age 1820-1845. Hershaw, Inglaterra, Ian Allan Ltd, 2007
- INSTITUTO DE ESTUDOS DO TRABALHO E SOCIEDADE – IETS. Centralidades da Região Metropolitana do Rio de Janeiro Relatório Final. p. 169, 2016.
- INTERNACIONAL UNION OF RAILWAYS, 2004 Code 406: Capacity
- IPEA. Mobilidade Urbana - O automóvel ainda é prioridade. 2011 . Ano 8 . Edição 67 - 20/09/2011, p. 1–5, 2011.
- JONE, J. Investigation and Estimation of Train Dwell Time for Timetable Planning. Proceedings of 9th World Congress on Railway Research. Anais...May 22-26: 2011
- KANSO, Karim; MOLLER Faron; SETZER, Anton. Automated Verification of Signalling Principles in Railway Interlocking Systems, Electronic Notes in Theoretical Computer Science, Volume 250, Issue 2, 2009, Pages 19-31, ISSN 1571-0661, <https://doi.org/10.1016/j.entcs.2009.08.015>.
- KUNIMATSU, T., HIRAI, C., TOMII, N., 2012. Train timetable evaluation from the viewpoint of passengers by microsimulation of train operation and passenger flow. Electr. Eng. Jpn. 181 (4), 51–62.
- KRSTANOSKI, N. Modelling passenger distribution on metro station platform, Int. J. Traffic Transp. Eng. 4 (2014) 456–465, [https://doi.org/10.7708/ijtpe.2014.4\(4\).08](https://doi.org/10.7708/ijtpe.2014.4(4).08).
- LAM, W. H. K., CHEUNG, C.Y., POON, Y. F. A study of train dwelling time at the Hong Kong mass transit railway system. Journal of Advanced Transportation, v. 32(3), p. 285–295, 1998a.
- LAM, W. H. K., CHEUNG, C.Y., POON, Y. F. A study of train dwelling time at the Hong Kong mass transit railway system. Journal of Advanced Transportation, v. 32, n. 3, p. 285–295, 1998b.

- LEE, J.; ARTS, J.; VANCLAY, F. Stakeholder views about Land Use and Transport Integration in a rapidly growing megacity: Social outcomes and integrated planning issues in Seoul. *Sustainable Cities and Society*, v. 67, n. January, p. 102759, 2021.
- LEWIS, M. J. T. "Railways in the Greek and Roman World". 2001. *Anais [...] Londres, Newcomen Society*, 2001. p. 8–19.
- LIN, T., WILSON, N., 1992. Dwell time relationships for light rail systems. *Transp. Res. Rec.: Journal of the Transportation Research Board* 1361, 287–295. Lu, J., Dong, F., 2010. Statistical analysis of the passenger distribution before getting on subway train. *Urban Mass Transit* 13 (7), 53–56 (in Chinese).
- LOUREIRO, V.; FRANÇA LEITE, V. Por Uma Região Metropolitana Eficiente, Equilibrada E Sustentável-Contribuição Da Câmara Metropolitana De Integração Governamental Do Estado Do Rio De Janeiro. v. 1, 2013.
- LUSBY, R.M., LARSEN, J., EHRGOTT, M., Ryan, D., 2011. Railway track allocation: Models and methods. *OR Spectrum* 33 (4), 843–883.
- Michaelis, M., Schöbel, A., 2009. Integrating line planning, timetabling, and vehicle scheduling: A customer-oriented heuristic. *Public Transp.* 1 (3), 211–232.
- MANDHANI, Jyoti; NAYAK, J. K.; PARIDA, Manoranjan. Establishing service quality interrelations for Metro rail transit: Does gender really matter? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 97, 2021, 102888, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102888>.
- MARIA, B.; PONTES, S. O planejamento dos transportes nas áreas metropolitana. *Cadernos Metrópole*, n. 14, p. 51–66, 2005.
- MATOS, R. Questões teóricas acerca da concentração e desconcentração da população no espaço. *Revista Brasileira de Estudos de População*, p. 35–58, 2014.
- MELLO, J. A. V. B. Centralidades e mobilidade urbana: O caso da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. [s.l.] UFRJ, 2013.
- MELO, P. C. , SOBREIRA, N. , GOULART, P. Estimating the long-run metro demand elasticities for Lisbon: A time-varying approach, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 126, 2019, Pages 360-376, ISSN 0965-8564, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.06.019>.

- METRORIO. Sobre o MetrôRio. Disponível em: <https://www.metrorio.com.br/Empresa/Historia?p_interna=2>. Acesso em: 8 mar. 2021.
- MIHESSEN, V.; MACHADO, L.; PERO, V. Mobilidade Urbana e Mercado de Trabalho na Região Metropolitana do Rio de Janeiro -. Natal: [s.n.].
- MOAVENI, B ,FATHABADI, F. R. ,MOLAVI, A.Supervisory predictive control for wheel slip prevention and tracking of desired speed profile in electric trains,ISA Transactions,Volume 101,2020, Pages 102-115,ISSN 0019-0578,<https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.01.011>.
- MONTGOMERY, D. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- NABAIS, R. J. da S. Manual básico de engenharia ferroviária. 1. ed. São Paulo, [s.n.], 2014
- NAN Y, YONG L (2017) Temporary Incentives Change Daily Routines: Evidence from a Field Experiment on Singapore’s Subways. Management Science 64(7):3365-3379.<https://doi.org/10.1287/mnsc.2017.2731>
- NATIONS, U. World Urbanization Prospects 2018. [s.l: s.n.].
- NILSSON, J.-E. Second-Best Problems in Railway Infrastructure Pricing and Investment. Journal of Transport Economics and Policy, v. 26, p. 245–259, 1992.
- OLIVEIRA L, Fox C, Birrell S, Cain R (2019) Analysing passengers’ behaviours when boarding trains to improve rail infrastructure and technology. Robot Comput Integr Manuf 57:282–291
- OLSSON NILS O.E.; HAUGLAND Hans, Influencing factors on train punctuality— results from some Norwegian studies,Transport Policy,Volume 11, Issue 4,2004,Pages 387-397, ISSN 0967-070X,<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2004.07.001>.
- PACHL, J. Railway Operation and Control. 3. ed. Mountlake Terrace, 2014.
- PALMQVIST, C.W., OLSSON, N. O. E. & WINSLOTT Hiselius, L.(2017b). Punctuality problems from the perspective of timetable planners in Sweden. Paper presented at EURO Working Group on Transportation Meeting 2017(EWGT 2017), September 4-6, Budapest, Hungary.
- PRADO, D. S. do. Teoria das filas e da simulação. 6a ed. Nova Lima, FALCONI editora, 2017.

- PUONG, A. Dwell time model and analysis for the MBTA red line Massachusetts Institute of Technology Research Memo, 2000a.
- PUONG, A. Dwell time model and analysis for the MBTA red line. Massachusetts Institute of Technology Research Memo, 2000b.
- RALFO MATOS & ROSANA BAENINGER. Migração e urbanização no Brasil: Processos de concentração e desconcentração espacial e o debate recente. Edição Especial 2000 a 2008, p. 342–386, 2008.
- RIKSREVISIONSVERKET, T/aa gtrafikens punktlighet, Revisionsrapport, Dnr. 1986:1091. Riksrevisionsverket, Stockholm, Sweden, 1986.
- RIO DE JANEIRO. Contrato de Concessão para exploração de serviços públicos do transporte metroferroviário de passageiros. Rio de Janeiro, 1999. Disponível em: http://www2.agetransp.rj.gov.br/contratos?_contratos_WAR_agetranspportlet_concessionaria=Metrô Rio
- RIO DE JANEIRO. Diagnóstico da situação fiscal. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.tesourotransparente.gov.br/publicacoes/novo-regime-de-recuperacao-do-estado-do-rio-de-janeiro/2022/30>
- RIZZI, C. A. A contabilidade da desapropriação: um exame preliminar sobre o circuito inferior da expansão urbana da metrópole de São Paulo. Revista do LABOR, p. 1–15, 2010.
- RODRIGUES, M. J.; SOARES, B. R. O plano diretor e o sistema integrado de transportes de Uberlândia (MG). Caminhos de Geografia 8(13)158-174, out/2004.
- ROUSSEEUW, Peter J.; HUBERT, Mia. Anomaly detection by robust statistics. WIREs Data Mining and Knowledge Discovery. Lovaina, Belgium, p. 3-4, nov. 2017
- RUBIM, B.; LEITÃO, S. O Plano de Mobilidade Urbana e o futuro das cidades. Estudos Avancados, v. 27, n. 79, p. 55–66, 2013.
- RUDNICKI, A., 1997. Measures of regularity and punctuality in public transport operation. Transportation systems, preprints of the Eighth International Federation of Automatic Control.
- RYAN, Brendan, GOLIGHTLY, David, PICKUP Laura, REINARTZ, Sue, ATKINSON, Sarah, DADASHI, Nastaran. Human functions in safety - developing a framework of goals, human functions and safety relevant activities

- for railway socio-technical systems, *Safety Science*, Volume 140, 2021, 105279, ISSN 0925-7535, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105279>.
- SIEFER, T. Simulation. In: HANSEN, I. A.; PACHL, J. *Railway Timetable and Traffic*. 1ª. ed. Hamburgo: Eurailpress, v. I, 2008. Cap. 9, p. 155-169
- SILVEIRA, M. R.; COCCO, R. G. Transporte público, mobilidade e planejamento urbano: Contradições essenciais. *Estudos Avancados*, v. 27, n. 79, p. 41–53, 2013.
- SKJAERET, J. "Kapasitetsberegninger", Working Paper, NSB Bane Ingeniørtjenesten, Oslo, 2002.
- SKARTSÆTERHAGEN, S. Capacity of railway lines (Kapacitet på jernbanestrekninger), Institute for Energy Technology, Norway, in Norwegian, 1993.
- SZPLETT D.; WIRASINGHE S.C., An investigation of passenger interchange and train standing time at LRT stations: (i) alighting, boarding and platform distribution of passengers, *J. Adv. Transp.* 18 (1984) 1–12, <https://doi.org/10.1002/atr.5670180102>.
- SZYMULA, C.; BEŠINOVIĆ, N. Passenger-centered vulnerability assessment of railway networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 136, p. 30–61, 2020.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2013) *Transit capacity and quality of service manual*, 3rd edn. Transportation Research Board, Washington, DC
- THONDOO, M. *et al.* Small cities, big needs: Urban transport planning in cities of developing countries. *Journal of Transport and Health*, v. 19, n. September, p. 1–14, 2020.
- UITP. Statistics brief world metro figures 2018. 2018. Disponível em: https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/Statistics-Brief-World-metro-figures-2018V3_WEB.pdf. Acesso em: 20 set. 2021.
- VIANA, R. A.; MANCINI, M. T.; LASMAR, R.D; ALVARENGA, A, C. Impactos da pandemia COVID-19 nos indicadores de desempenho operacional do metrô do Rio de Janeiro. São Paulo: AEAMESP, 2020. Disponível em: <https://26educacao.semanadetecnologia.com.br/programacao/impactos-da-pandemia-covid-19-nos-indicadores-de-desempenho-operacional-no-metro-do-rio-de-janeiro>
- WEIK, Norman; NIEBEL, Nora; NIEßEN, Nils. Capacity analysis of railway lines in Germany – A rigorous discussion of the queueing based approach, *Journal of Rail*

Transport Planning & Management, Volume 6, Issue 2, 2016, Pages 99-115, ISSN 2210-9706, <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.06.001>.

WIGGENRAAD, P. B. . Alighting and boarding times of passengers at Dutch railway stations analysis of data collected at 7 stations in October 2000. TRAIL Research School: Delft University of Technology, Delft, 2001.

WOOLDRIDGE, J. M. Econometric analysis of cross section and panel data. MIT press, 2010.

YANG, Kai; LU, Yahan; YANG, Lixing; GAO, Ziyou. Distributionally robust last-train coordination planning problem with dwell time adjustment strategy. *J. Applied Mathematical Modelling* 91, 1154-1174 (2021).

YAMAMURA, A., KORESAWA, M., INAGI, T., TOMII, N. Dwell time analysis in Railway Lines using Multi Agent Simulation. 13th World Conference on Transportation Research (WCTR). Anais...July 15-18, Rio de Janeiro, Brazil: 2013

YOUNG, C. E. F.; AGUIAR, C.; POSSAS, E. Sinal fechado: custo econômico do tempo de deslocamento para o trabalho na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. *Revista Econômica*, v. 15, n. 2, p. 9–22, 2013.

YUAN, Jianxin & HANSEN, I.A.. (2002). Punctuality of Train Traffic in Dutch Railway Stations. 522-529. 10.1061/40630(255)73.

ZAKERI, G., OLSSON, N.O.E. Investigating the effect of weather on punctuality of Norwegian railways: a case study of the Nordland Line. *J. Mod. Transport.* 26, 255–267 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40534-018-0169-7>

ZHAO, J., KÜNZLI, O., 2016. An introduction to connectivity concept and an example of physical connectivity evaluation for underground space. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 55, 205–213. ZHENG Z, HIDEMICHI F, SHUNSUKE M, How does commuting behavior change due to incentives? An empirical study of the Beijing Subway System, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Volume 24, 2014, Pages 17-26, ISSN 1369-8478, <https://doi.org/10.1016/j.trf.2014.02.009>.

ZHENGWEN Liao, JIANRUI Miao, LINGYUN Meng, HAIYING Li (2020): A resource oriented decomposition approach for train timetabling problem with variant running time and minimum headway, *Transportation Letters*, DOI: 10.1080/19427867.2020.1824310

ANEXOS

Gráficos Boxplot: Valores realizados x tempo calculado pelo modelo de simulação – Linha 1/4 e Via 1 (Trens que Circulam de Uruguai para Jardim Oceânico)



Gráficos Boxplot: Valores realizados x tempo calculado pelo modelo de simulação – Linha 1/4 e Via 2 (Trens que Circulam de Jardim Oceânico para Uruguai)



Gráficos de Dispersão: Valores realizados x tempo calculado pelo modelo de simulação – Linha 1 e Sentido 1 (Trens que Circulam de Urugui para Jardim Oceânico)



Gráficos de Dispersão: Valores realizados x tempo calculado pelo modelo de simulação – Linha 1 e Sentido 2 (Trens que Circulam de Jardim Oceânico para Uruguai)



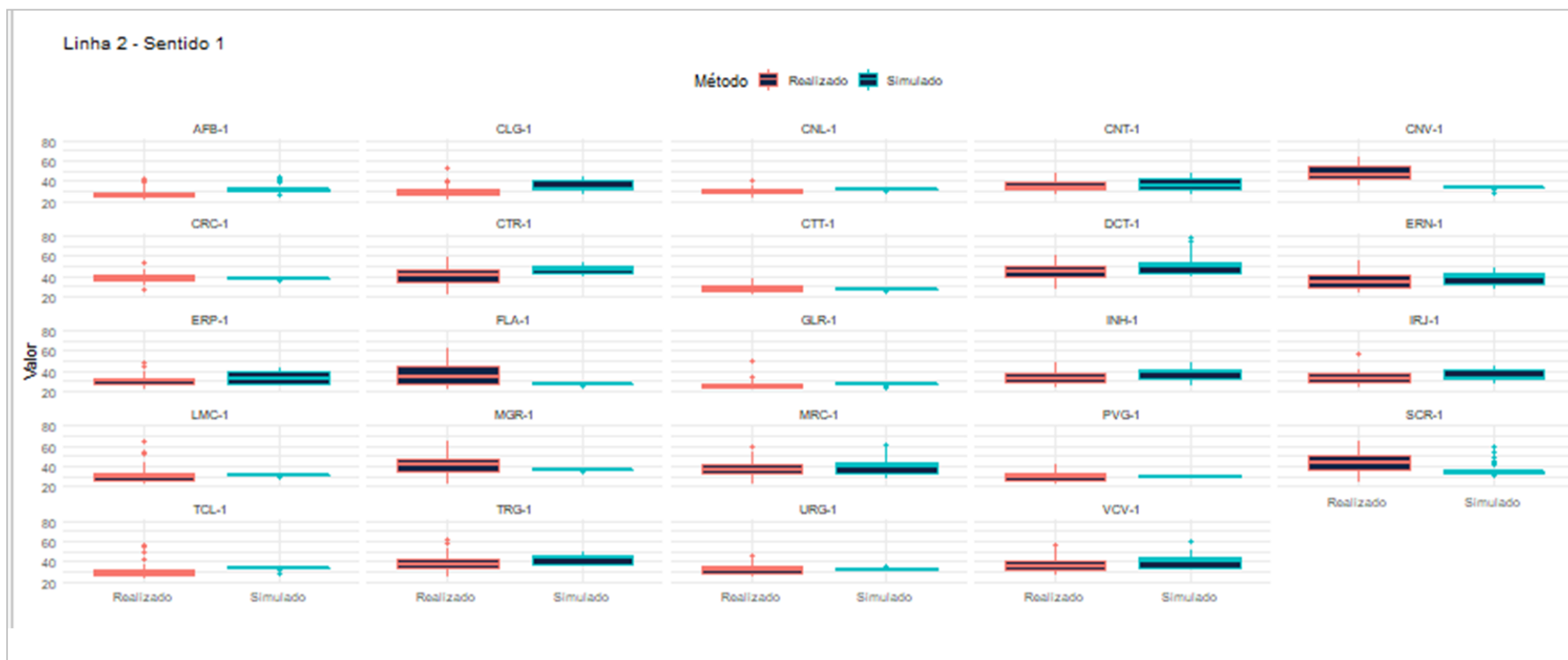
Gráficos de Dispersão: Valores realizados x tempo calculado pelo modelo de simulação – Linha 1 e Sentido 1 (Trens que Circulam de Pavuna para Botafogo)



Gráficos de Dispersão: Valores realizados x tempo calculado pelo modelo de simulação – Linha 1 e Sentido 2 (Trens que Circulam de Botafogo para Pavuna)



Gráficos Boxplot: Valores realizados x tempo calculado pelo modelo de simulação – Linha 2 e Sentido 1 (Trens que Circulam de Pavuna para Botafogo)



Gráficos Boxplot: Valores realizados x tempo calculado pelo modelo de simulação – Linha 2 e Sentido 2 (Trens que Circulam de Botafogo para Pavuna)



Resultado gráfico da comparação dos horários planejados e do processo de circulação simulado.

