



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS
CATEGORIA (3)

USO DOS DADOS DE BILHETAGEM E SIMULAÇÃO PREDITIVA NO ANYLOGIC
PARA GESTÃO DE TRÁFEGO NO METRÔ BH

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas metroferroviários são a espinha dorsal da mobilidade de alta capacidade nas grandes metrópoles mundiais (VUCHIC, 2007). Em um cenário de intensa urbanização, essas redes são fundamentais para reduzir congestionamentos e emissões de poluentes (UITP, 2023). Contudo, o envelhecimento das estruturas globais impõe um desafio complexo aos gestores que enfrentam a necessidade de executar intervenções pesadas de manutenção e modernização tecnológica em ativos obsoletos (CASCETTA, 2009). O grande impasse atual do setor reside em viabilizar essas janelas de obras invasivas na via sem interromper o fluxo diário ou degradar severamente o conforto de milhões de usuários que dependem do modal. No contexto brasileiro, o setor metroferroviário historicamente enfrentou restrições de investimentos e de expansão da malha que resultaram em redes limitadas e sistemas tecnológicos defasados (ANTP, 2023). Para buscar eficiência operacional, o país adotou uma



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

tendência de desestatização, transferindo linhas públicas para a iniciativa privada via concessões e Parcerias Público-Privadas (ANP TRILHOS, 2025). Todavia, as concessionárias assumem esses ativos com o desafio de executar cronogramas agressivos de modernização e revitalização das vias (GOMES et al., 2021). Essa realidade exige das empresas metodologias sofisticadas de planejamento para mitigar o impacto de obras invasivas sobre o fluxo de passageiros.

Esse cenário impacta Belo Horizonte, polo da terceira maior concentração urbana do país, com 2,3 milhões de habitantes na capital e mais de 6 milhões na região metropolitana (IBGE, 2023). Como elemento central desse fluxo massivo, o Metrô BH opera 28 km de extensão e 19 estações, registrando uma Média de Dia Útil (MDU) de 90 mil usuários integrados aos ônibus. Após a transição institucional de 2023, a concessionária iniciou um cronograma intensivo de modernização que gerou restrições operacionais críticas. O ápice ocorreu em novembro de 2025, quando uma intervenção em via singela elevou o intervalo entre trens de 7,5 para 21 minutos no pico, evidenciando riscos de superlotação no sistema.

Diante de tais restrições, o planejamento ferroviário tradicional falha ao utilizar dados estáticos de entrada por estação, incapazes de prever a dinâmica real dos fluxos (PELLETIER et al., 2011). Para superar essa limitação e antecipar gargalos, a simulação computacional surge como ferramenta indispensável de suporte à decisão (LAW, 2014). Este trabalho inova ao utilizar o *software* AnyLogic para integrar dados de bilhetagem do Metrô BH, estruturando a matriz Origem-Destino dinâmica por faixa horária (BORSHCHEV, 2013). Essa



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

abordagem virtual confronta a capacidade da frota com as demandas reais de embarque, substituindo decisões empíricas por diretrizes estritamente baseadas em dados.

Diante desse panorama, o objetivo geral deste artigo é apresentar o desenvolvimento de um modelo de simulação computacional preditivo, elaborado no *software* AnyLogic, voltado à gestão de tráfego do Metrô BH em cenários de modernização com restrições na via. Como objetivos específicos, o trabalho busca balancear as restrições físicas de circulação de trens com os impactos de lotação percebidos pelos usuários nas plataformas e composições. O trabalho busca ainda formular uma função objetiva ponderada conectando variáveis operacionais como *headway*, retenções na via e tempo médio de percurso, mapeando de forma preditiva os pontos críticos de superlotação nas estações para direcionar o planejamento da operação e da segurança.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Planejamento Operacional e Gestão de Tráfego Metroferroviário

O planejamento operacional em sistemas de transporte público visa compatibilizar a oferta de assentos à demanda de passageiros (VUCHIC, 2007). No ambiente metroferroviário, essa dinâmica se traduz na programação horária, cujo desempenho é condicionado pelo *headway* — o intervalo de tempo entre composições consecutivas (BURDETT; KOZAN, 2006). A redução desse intervalo aumenta a capacidade de transporte da linha, mas seu limite mínimo é rigidamente limitado pela tecnologia de sinalização e sistemas de segurança ferroviária. Consequentemente, qualquer restrição física que force o aumento do *headway*



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

reduz imediatamente a oferta de lugares e gera desequilíbrios no escoamento das plataformas.

Esse cenário torna-se crítico quando interdições na infraestrutura forcem o sistema a operar em via singela. A circulação de trens em sentidos opostos compartilhando o mesmo trilho elimina a flexibilidade operacional e cria gargalos estruturais nos pontos de transição (GOVERDE et al., 2016; ABRANTES et al., 2020). Essa dinâmica gera atrasos sistemáticos que estendem o tempo de espera nas estações e provocam picos instantâneos de superlotação (CORMAN et al., 2014). O excesso de passageiros nas plataformas, por sua vez, eleva o tempo de parada dos trens (dwell time) para embarque e desembarque (HARRIS, 2006). Consolida-se, assim, um ciclo vicioso: o trem atrasa porque a plataforma está cheia, e a plataforma enche ainda mais devido ao atraso do trem subsequente (VAN DEN HEUVEL et al., 2019).

2.2 Sistemas de Bilhetagem Eletrônica e Modelagem de Matrizes

Origem-Destino

Os sistemas de bilhetagem eletrônica automatizaram a coleta de dados de demanda ao registrar passivamente o embarque de cada usuário através de cartões inteligentes (smart cards) nos bloqueios das estações (BAGCHI; WHITE, 2005; PELLETIER et al., 2011). O processamento dessa base contínua permite estruturar a Matriz Origem-Destino (OD), ferramenta matemática que organiza os fluxos de viagens entre as estações da rede em intervalos temporais específicos (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011). Na engenharia ferroviária, o



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

mapeamento preciso desses fluxos é indispensável para estimar a carga nos trechos críticos da linha e dimensionar a oferta de trens de forma aderente às necessidades reais de deslocamento (SPIESS; FLORIAN, 1989).

Como as catracas geralmente registram apenas a entrada do passageiro, a modelagem recorre a algoritmos de encadeamento de viagens para deduzir o destino final com base no local da validação subsequente do usuário (ZHAO et al., 2007; MUNIZAGA; PALMA, 2012). Uma vez tratada, essa matriz OD dinâmica é integrada a *softwares* de simulação computacional. Ao cruzar os horários das validações dos cartões com a tabela de circulação real das composições, o modelo virtual consegue replicar a entrada minuto a minuto de passageiros e prever com alta fidelidade a formação de gargalos de acúmulo nas plataformas sob cenários de restrição operacional ou falhas na via (ALSGER et al., 2016; NOURI et al., 2022).

2.3 Nível de Serviço, Dinâmica de Lotação e Microssimulação Pedestre

A avaliação das condições de circulação e segurança em plataformas de embarque baseia-se no conceito de Nível de Serviço (LOS) de Fruin (1971). Esse indicador classifica a qualidade do fluxo em faixas de "A" (livre) a "F" (extrema aglomeração) conforme a densidade de ocupação espacial (TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2010). Na realidade operacional, a distribuição dessa demanda ocorre de forma assimétrica ao longo das estações. Os usuários tendem a se concentrar nos arredores dos acessos e nos pontos exatos de parada das portas dos trens (PUSHKAREV; ZUPAN, 1975). Essa ocupação desigual satura trechos isolados da



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

plataforma, gerando gargalos severos enquanto as extremidades permanecem subutilizadas (STILL, 2000).

Essa aglomeração localizada é severamente agravada pela quebra de regularidade nos intervalos de passagem (*headway*). Diante de atrasos na linha, a entrada constante de passageiros vindos dos bloqueios gera um represamento imediato que degrada rapidamente o nível de serviço da plataforma (LAM et al., 2003). Sob densidades extremas, o tempo de embarque e desembarque (*dwell time*) é estendido devido ao atrito físico nas portas dos carros (SERIANI; FERNANDEZ, 2015). A velocidade de movimentação cai drasticamente e o fluxo de pedestres passa a responder a pressões físicas pelo contato entre os corpos, elevando os riscos de acidentes e pisoteamentos (SEYFRIED et al., 2006; SCHADSCHNEIDER et al., 2009).

Para analisar essas interações complexas, a engenharia de transportes recorre à microsimulação computacional de pedestres baseada em agentes (HOOGENDOORN; BOVY, 2001). Essa metodologia modela cada usuário de forma individual através do modelo de forças sociais, em que o deslocamento responde a vetores de atração e repulsão (HELBING; MOLNÁR, 1995). O *software* integra a dinâmica humana à circulação dos trens, calculando taxas de ocupação espacial e níveis de serviço em tempo real (NIKOLSKIS et al., 2019). O ambiente virtual serve como um laboratório de alta precisão para diagnosticar gargalos e testar estratégias de fluxo antes de sua implantação (KLÜGL; BAZZAN, 2012; MACAL; NORTH, 2010).



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

3. DIAGNÓSTICO

3.1 Empirismo na Programação Horária e Rigidez das Grades de Operação

A elaboração das tabelas dos programas horários (PH) do sistema apoia-se no histórico de planilhas antigas e no conhecimento prático das lideranças. Quando surgem interdições na infraestrutura, a definição dos novos intervalos (*headways*) ocorre por estimativas diretas baseadas em tempos de viagem registrados anos atrás. Esses registros foram consolidados em um período em que a frota era homogênea, sem a circulação de novos trens, e a via não passava pelo ritmo atual de obras. Este modelo tradicional calcula a grade horária de forma isolada, sem cruzar a circulação com as validações de entrada das catracas. Sem essa integração de dados, a operação perde totalmente a visão do impacto do intervalo no acúmulo de passageiros nas estações, deixando as discussões de tráfego sem validação matemática em dados de campo reais.

Essa rigidez nos tempos de ciclo é herança direta da cultura operacional anterior à concessão da rede, fase em que a grade horária permanecia estática devido à falta de reformas estruturais. Na antiga gestão pública, a manutenção restringia-se a reparos rápidos de madrugada, mantendo os mesmos horários por anos. A chegada da concessionária coincidiu com o recebimento de novas composições e a necessidade de realizar modificações nas oficinas para adaptar a frota antiga aos novos sistemas de via. O planejamento, contudo, continuou usando as referências de uma época em que a frota e a infraestrutura eram estáveis, gerando atrasos crônicos ao tentar conciliar testes de trens e obras pesadas.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

A falha desse método empírico ficou evidente nas obras de revitalização da via permanente, rede aérea e na sinalização. Para manter o fluxo ferroviário ativo durante os trabalhos de campo, a operação passou a funcionar em via singela e com 2 carrosseis em determinados trechos, aplicando intervalos diferentes do habitual no horário de pico. Como o planejamento formulava a grade horária olhando apenas o tempo mecânico de deslocamento dos trens, sem prever o impacto dessa restrição no acúmulo de passageiros, o programa horário apresentava falhas ocultas. Esse isolamento analítico impossibilitava prever as taxas reais de ocupação dos trens e a superfície das plataformas, resultando em cenários de superlotação imprevistos que travavam a circulação.

3.2 Invisibilidade dos Fluxos de Viagem e Desconhecimento do Carregamento

Crítico

A segunda grande deficiência do diagnóstico operacional reside na assimetria de informações a respeito do comportamento dos usuários dentro do sistema. A engenharia de operações dispunha exclusivamente dos dados brutos de entrada do sistema de bilhetagem eletrônica das catracas de cada estação. Embora esse volume total de acessos fosse conhecido, o sistema não registrava o desembarque dos passageiros, uma vez que as saídas na rede metroferroviária são livres e não exigem a passagem do bilhete. Essa limitação técnica abria uma lacuna nas planilhas de planejamento, cortando o rastreamento do passageiro logo após ele passar pela linha de bloqueio das estações.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Sem o registro das saídas, o planejamento corria o risco de errar a divisão da demanda entre o Sentido A e o Sentido B da ferrovia. O desconhecimento do destino final dos usuários impedia mapear quais estações concentravam os maiores desembarques ao longo das faixas horárias do dia. A engenharia dependia de contagens visuais e relatórios antigos para estimar a distribuição do público dentro dos trens. Essa falta de controle impossibilitava a montagem de uma Matriz Origem-Destino confiável, deixando o setor de tráfego sem histórico estatístico para entender a dinâmica de viagem da massa de passageiros.

A consequência direta dessa falta de dados era o desconhecimento do trecho de maior carregamento do trecho nos horários de pico. Sem fixar numericamente o ponto de estrangulamento da linha, a engenharia não conseguia calcular a oferta correta de lugares nos trens. As composições entravam em linha baseadas em médias gerais de bilhetagem, gerando trens superlotados nos trechos de maior pressão. Esse apagão inviabilizava estratégias de tráfego focadas na demanda real, já que não havia provas de onde e quando o carregamento crítico ocorria.

3.3 Modelo Reativo de Gestão de Tráfego pelo Centro de Controle Operacional (CCO)

A terceira deficiência do modelo operacional reflete-se na tomada de decisão do Centro de Controle Operacional (CCO) diante de atrasos na linha. Sem ferramentas preditivas para antecipar o acúmulo de usuários nas plataformas, o CCO depende exclusivamente do monitoramento visual feito por câmeras de segurança. Essa metodologia restringe a atuação



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

dos controladores à extensão visível das plataformas, impedindo que o comando central saiba a real ocupação das composições que estão vindo dos trechos em via singela. Toda a regulação do carrossel com a injeção de viagens extra ocorre com base no cenário imediato das imagens, sem qualquer projeção matemática de fluxo para os minutos seguintes.

O acionamento dessas estratégias de contingência funciona de maneira emergencial nas faixas de maior movimento. O CCO só determina a partida de um trem reserva quando os monitores do circuito fechado de TV mostram as plataformas cheias ou quando os agentes de estação relatam falhas no fechamento de portas por superpopulação. Como essa ordem de despacho ocorre após o problema estar instalado fisicamente na plataforma, o tempo de resposta técnica consome minutos valiosos para a preparação da frota e o deslocamento a partir do pátio de manobras. Esse atraso na reação faz com que o reforço chegue ao ponto de estrangulamento quando o gargalo já gerou retenções em cadeia.

Essa dinâmica imediatista causa ineficiência no aproveitamento da frota disponível e agrava os impactos das restrições na via. Ao lançar os trens reservas sem o cruzamento com dados reais de carregamento por trecho, o CCO corre o risco de posicionar a composição atrás de filas já formadas nos pontos de cruzamento da via singela. O resultado prático é o travamento dessas viagens em circuitos de sinalização fechados, anulando o efeito do escoamento e gerando custos desnecessários de quilometragem rodada. O monitoramento visual limita o CCO a conter danos de um colapso que já aconteceu nas estações.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

3.4 Defasagem no Planejamento e Dimensionamento do Contingente de Segurança

O reflexo final desse apagão de dados preditivos atinge diretamente a gestão de segurança e o atendimento nas plataformas. O dimensionamento das equipes baseia-se em escalas estruturadas com base em históricos de fluxo da operação normal de anos atrás. Embora existisse uma noção prévia do volume de passageiros baseada nas entradas das catracas e no empirismo diário das equipes, a gestão carecia de certeza matemática sobre o adensamento real nas plataformas durante as restrições de via. Como o planejamento não cruzava intervalos estendidos com as taxas de ocupação, o setor de segurança operava no escuro sobre quais estações sofreriam picos severos. Essa incerteza impedia o remanejamento estratégico do efetivo, deixando a ponta sem reforço nos momentos de maior pressão.

A quebra de sincronia na escala de segurança gerava gargalos severos em faixas horárias específicas, inviabilizando o controle de fluxo na via singela. Com o efetivo reduzido nesses períodos, as equipes não conseguiam propagar avisos operacionais de forma clara, deixando os usuários confusos quanto aos tempos de espera e sentidos dos trens nas plataformas. Essa falta de orientação gerava tumultos nos bloqueios e correria nas escadas sempre que uma composição se aproximava, criando riscos de quedas e pisoteamento nos limites da via. A desordem no embarque esticava o tempo de parada nas estações e atrasava o fechamento de portas, retroalimentando o ciclo de atrasos no carrossel.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

3.5. Consolidação do Cenário Crítico de Restrição na Via Singela (Novembro de 2025)

A operação convencional do Metrô de Belo Horizonte em dias úteis sem intervenções na via processa uma demanda média de 90 mil passageiros diários. Sob condições normais, o sistema funciona com fluxo livre em ambas as linhas, operando um carrossel único que cobre toda a extensão entre as estações Eldorado e Vilarinho com um *headway* de 7,5 minutos nos horários de pico. Esse arranjo padrão garante a regularidade dos tempos de viagem e a distribuição uniforme da demanda ao longo das 19 estações, servindo como a linha de base para medir os impactos causados por manutenções severas na infraestrutura.

O cenário tornou-se crítico entre os dias 18 e 24 de novembro de 2025, período em que uma intervenção de revitalização da via permanente ocupou um trecho de 245 metros na Via 2 (V2), na curva 12-2B entre as estações Horto e Santa Inês. Para viabilizar os trabalhos sem paralisar o sistema, a engenharia operacional precisou implementar duas seções de via singela simultâneas: uma entre Minas Shopping e Santa Tereza, decorrente da revitalização na V2, e outra entre as estações Gameleira e Vila Oeste com restrição de velocidade de 25 km/h, motivada pelas obras da nova estação Nova Suíça. A operação manteve o desafio de escoar os mesmos 90 mil passageiros diários, porém sob uma malha ferroviária severamente estrangulada pelas restrições de passagem única e velocidade reduzida.

Para contornar os gargalos físicos das vias singelas durante o horário de pico, a estratégia operacional dividiu a frota em dois carrosséis sobrepostos na linha, como ilustra a Figura 1. O



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

primeiro carrossel realizava viagens curtas entre as estações Eldorado e Central com intervalos de 11 minutos, enquanto o segundo cobria o trajeto completo de Eldorado a Vilarinho a cada 22 minutos. Essa sobreposição de programações alternava as partidas na estação Central e gerava um intervalo combinado irregular nas plataformas. Essa complexidade logística evidencia a necessidade de ferramentas de simulação computacional, capazes de modelar dinamicamente os tempos de espera dos usuários e os potenciais atrasos gerados pelos cruzamentos de trens na via.

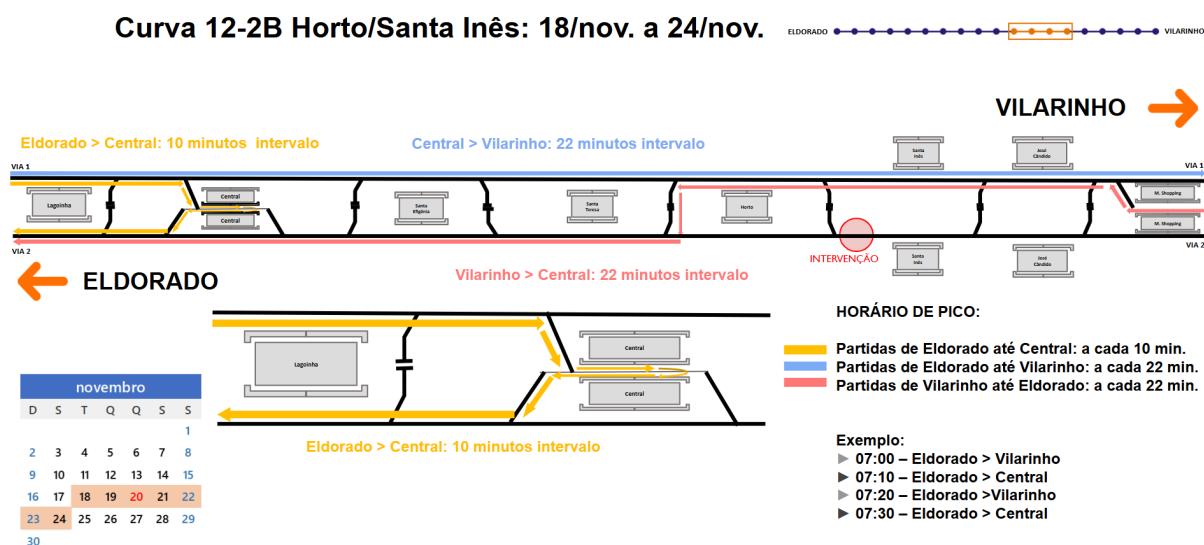


Figura 1: Resumo da operação da revitalização entre o trecho das estações Horto e Santa Inês .

4. METODOLOGIA

4.1 Coleta, Tratamento e Calibração dos Dados de Oferta



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A calibração dos tempos de ocupação de cada circuito de via (CDV) no programa Anylogic baseou-se na extração de dados reais de circulação diretamente do sistema de sinalização SICTE do Metrô BH. O levantamento envolveu o mapeamento do tempo individual que os trens gastavam para transitar e liberar cada circuito de via (CDV) da linha. Nesse mapeamento, os tempos de parada nas estações foram embutidos diretamente no tempo de ocupação do CDV correspondente à plataforma, o que explica a maior duração registrada nesses pontos específicos. Ao somar os tempos de ocupação de todos os CDVs de um determinado trecho, o modelo obtinha, por consequência, o tempo total de viagem operacional real e do carrossel da linha.

O passo seguinte consistiu no tratamento e consolidação desses tempos de ocupação para servir de entrada no *software* de simulação Anylogic. Como a Linha 1 operava com uma frota heterogênea composta por trens novos, trens antigos e trens em processo de modernização do sistema ATC, os tempos de circulação não eram uniformes na via. Diante dessa variação entre as composições, utilizou-se a média dos tempos de ocupação registrados para cada CDV. Essa abordagem traduziu a oscilação real do carrossel em valores fixos de referência por circuito de via, eliminando as premissas defasadas das planilhas antigas da equipe de planejamento, que programavam os tempos macro por trecho entre estações e operavam sob a lógica de uma frota historicamente mais homogênea. Essa mudança refinou a precisão do modelo ao mapear os tempos de deslocamento entre CDVs da via.

4.2 Lógica de Modelagem do Tráfego dos Trens



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

4.2.1 Geometria da Via e Lógica de Disparo entre Trens

A primeira etapa no AnyLogic consistiu em desenhar a Linha 1 do Metrô BH, focando apenas no tráfego dos trens e deixando os passageiros para um segundo momento. Com base nas plantas técnicas da via, a linha foi reconstruída de forma detalhada dentro do ambiente de simulação. Esse processo envolveu o desenho individual de cada circuito de via (CDV), respeitando as posições e comprimentos reais de cada bloco. Além das vias principais, foram inseridos todos os Aparelhos de Mudança de Via (AMV) exatamente nos pontos onde estão instalados na linha real. Essa modelagem inicial garantiu que a estrutura virtual refletisse com precisão a malha física do metrô onde os trens circulam, como ilustra a Figura 2.

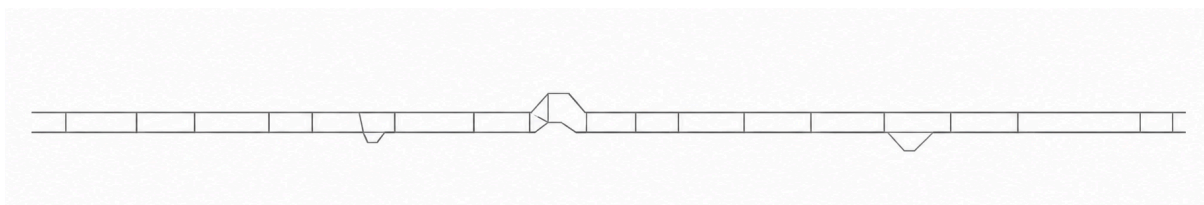


Figura 2: Malha ferroviária Linha 1 do Metrô BH.

Com a malha desenhada, criaram-se duas tabelas internas de *input* no AnyLogic para estruturar a operação da linha. A primeira foi dedicada às características físicas da infraestrutura, cadastrando cada CDV com seu comprimento, identificação de presença de AMV, a via localizada e se o bloco pertencia a uma estação, incluindo sua respectiva sigla operacional. A segunda tabela continha a relação de todos os CDVs vinculada diretamente aos seus respectivos tempos médios de circulação e ocupação tratados. Em paralelo, mapearam-se todas as rotas possíveis que as composições poderiam executar ao passar



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

pelos circuitos com AMV, inserindo regras lógicas para que o simulador direcionasse corretamente os desvios e alinhamentos nos pontos de bifurcação da via.

Concluída a estrutura de caminhos, a lógica de movimentação foi desenvolvida sob duas premissas de disparo dos trens: a leitura direta de uma planilha de programa horário real ou a geração automática de um plano com base em um *headway* parametrizado. Os trens entravam em circulação no ambiente virtual respeitando os horários de partida, injeções na linha e recolhimentos programados para o pátio. A lógica englobou as regras de deslocamento ao longo de toda a extensão da Linha 1, incluindo o comportamento nos trechos operados em via singela. Por fim, inseriram-se as manobras de reversão nos terminais, garantindo que, ao finalizar uma viagem, a composição realizasse a mudança de sentido conforme a origem e o destino definidos no plano operacional ativo.

4.2.2 Modelagem do Problema e Regras de Sinalização da Via

O desenvolvimento da ferramenta no AnyLogic utilizou a biblioteca padrão de modelagem de processos (Process Modeling Library) combinada com funções em linguagem Java, como mostra a Figura 3. A opção por essa biblioteca padrão justificou-se pela maior liberdade e flexibilidade que ela oferece para customizar a modelagem, evitando as restrições de blocos proprietários. A estrutura foi concebida de forma modular para que parâmetros operacionais, como tempos de abertura de portas e intervalos entre trens, fossem controlados por variáveis. Para conectar as tabelas de inputs físicos e de tempos criadas anteriormente ao fluxo do simulador, construiu-se uma lógica onde os CDVs funcionam como



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

Em paralelo, a flexibilidade dessa modelagem permitiu configurar o sistema para suportar operações complexas com múltiplos carrosséis simultâneos ao longo da linha. As tabelas parametrizadas da via singela e dos carrosséis operam de forma integrada, conversando entre si para que o modelo cruze os limites físicos dos trechos em obras com as rotas específicas de cada frota. As rotinas lógicas em Java garantem que os trens de cada carrossel respeitem os seus respectivos terminais e intervalos de *headway* sem gerar conflitos de tráfego nos trechos comuns. Essa arquitetura dinâmica viabilizou a simulação de cenários operacionais severos, onde o carrossel principal interage diretamente com laços de circulação restritos a partir dos dados cruzados de entrada.

4.3 Lógica de Modelagem de Passageiros

4.3.1. Tratamento dos Dados de Demanda e Construção da Matriz OD

A estimativa da matriz de Origem e Destino (OD) foi estruturada inicialmente a partir dos microdados de transações dos cartões de passagem para um dia útil típico da operação. A metodologia consistiu em rastrear as viagens sequenciais de cada usuário ao longo do dia, associando o primeiro embarque registrado à zona de origem e o segundo embarque ao destino da viagem. Para garantir a consistência estatística do comportamento de deslocamento pendular, foram expurgados da amostra os registros de usuários que utilizaram o sistema apenas uma vez no período avaliado. Esse procedimento permitiu isolar os fluxos contínuos de ida e volta, dividindo os dados em matrizes específicas para os períodos de pico da manhã, entropico (vale) e pico da tarde.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

Essa segmentação por faixas horárias foi compatibilizada com os registros gerais de passagens nos bloqueios das estações do Metrô de Belo Horizonte. O procedimento permitiu incorporar ao universo amostral os usuários que acessam o sistema por meios de pagamento instantâneos ou bilhetes físicos, como Pix, QR Code, cartões de crédito e débito, além do fluxo de gratuidades. O cruzamento expandiu a amostragem inicial dos cartões e consolidou o volume total de entradas para cada um dos três períodos operacionais mapeados. A partir desses blocos de demanda definidos por faixa horária, o simulador obteve os valores reais de carregamento de passageiros necessários para dar início à modelagem do fluxo nas plataformas.

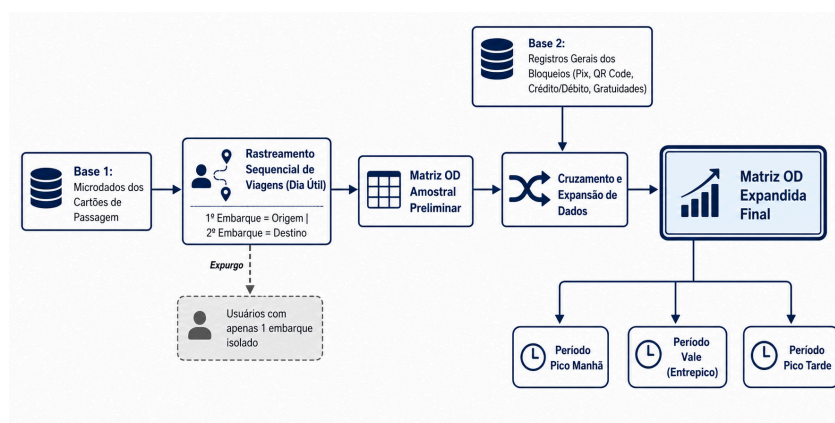


Figura 4: Fluxograma de processamento, expansão e segmentação horária da matriz Origem-Destino.

4.3.2. Direccionamento por Sentido e Alocação nas Plataformas

Com as matrizes OD segmentadas por período, desenvolveu-se uma lógica no AnyLogic para identificar a direção de deslocamento de cada passageiro que ingressa no sistema. A partir



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

da estação de entrada e do destino final mapeado, o simulador cruza os dados com a base de bilhetagem para classificar a viagem como Sentido 1 (Estação Vilarinho) ou Sentido 2 (Estação Eldorado). Esse direcionamento é crucial, pois o arranjo físico das estações segrega o fluxo de usuários em plataformas distintas conforme o rumo da viagem. No modelo, essa injeção de demanda foi programada por meio de um elemento do tipo evento, configurado para ler as matrizes e alocar de forma contínua, a cada minuto, o volume de usuários nas respectivas plataformas da linha.

4.3.3. Integração Dinâmica entre o Fluxo de Passageiros e o Tráfego de Trens

A convergência entre os sistemas de tráfego e de demanda ocorre no momento da parada dos trens nas plataformas. Cada composição inserida na simulação possui um array interno que monitora e atualiza a quantidade de usuários a bordo e os seus destinos, ilustrado na Figura 5, por meio das taxas de embarque e desembarque geradas pela matriz OD. Ao abrir as portas, o modelo executa uma lógica que absorve a quantidade máxima possível de passageiros aguardando na plataforma, respeitando o limite físico de capacidade do trem. Caso a composição atinja sua lotação máxima, o excedente de usuários é retido na estação para aguardar a próxima viagem, gerando as filas e os tempos de espera que servem de insumo para avaliar o nível de serviço do sistema.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

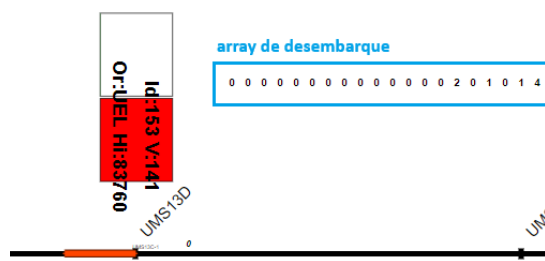


Figura 5: Array de desembarque dos passageiros de uma determinada viagem

4.4 Definição da Função Objetivo e Critérios de Conforto

A avaliação dos cenários simulados foi estruturada através de uma função objetivo criada para medir o impacto operacional das obras na linha 1. Essa equação cruza três variáveis calculadas pelo modelo: a lotação de passageiros nas plataformas, o intervalo e ocupação dos trens, e o tempo total de retenção gerado nos trechos de via singela. Como as prioridades da operação podem mudar dependendo da gravidade da obra, os pesos de ponderação (P_2 , P_3 e P_4) foram deixados como variáveis abertas no modelo. Dessa forma, quem estiver operando o simulador tem total liberdade para definir qual critério quer priorizar na análise do cenário.

A função demonstrada na Figura 6 retorna um valor de penalidade calculado pela expressão matemática.

$$\text{Min } Z = (O_{\text{est}} \cdot P_3) + (O_{\text{trem}} \cdot P_2) + (R_{\text{sing}} \cdot P_4)$$

Figura 6: Função objetivo do modelo para minimização do impacto operacional aos usuários.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Onde OEst representa a ocupação máxima registrada nas estações, OTtrem é a penalidade de *headway* e lotação dos trens, e RSing o total de retenções na via singela. Para achar o valor de OEst, o código executa um laço de repetição (loop) que varre as dezenove estações do Metrô BH e extrai o maior índice de ocupação encontrado entre os dois sentidos de circulação. O objetivo do simulador é encontrar a configuração operacional que resulte no menor valor de Z possível, ou seja o menor impacto ao passageiro, equilibrando o conforto do usuário com a fluidez dos trens.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos resultados consistiu em rodar no simulador AnyLogic os cenários operacionais propostos para mitigar os gargalos gerados pelas obras na via. Utilizando a base de dados tratada e as regras lógicas de tráfego ferroviário e fluxo de passageiros, o modelo gerou as métricas de lotação para cada configuração testada. Esses indicadores brutos foram consolidados através da função objetivo desenvolvida, gerando o valor de penalidade para cada caso avaliado. Para focar nos pontos mais críticos da operação, os resultados apresentados a seguir detalham especificamente o comportamento do sistema durante os horários de pico da manhã e da tarde, divididos em duas seções para facilitar o entendimento técnico.

5.1. Comportamento Operacional nas plataformas (Sentidos 1 e 2)

5.1.1. Pico Manhã



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

Para estruturar a análise do comportamento da demanda, foram realizados recortes sistemáticos da tela de animação do simulador AnyLogic em intervalos de 15 minutos, sendo o período de pico da manhã considerado especificamente das 07:00 às 08:45. A partir desses registros visuais, os dados brutos de acúmulo de passageiros foram extraídos e consolidados em tabelas por sentido de circulação para ilustrar o comportamento da demanda nas estações. A Figura 7 apresenta um exemplo do modelo em execução no AnyLogic, ilustrando como o simulador exibe dinamicamente o volume instantâneo de usuários (em vermelho) nas dezenove estações e a posição das composições na via.

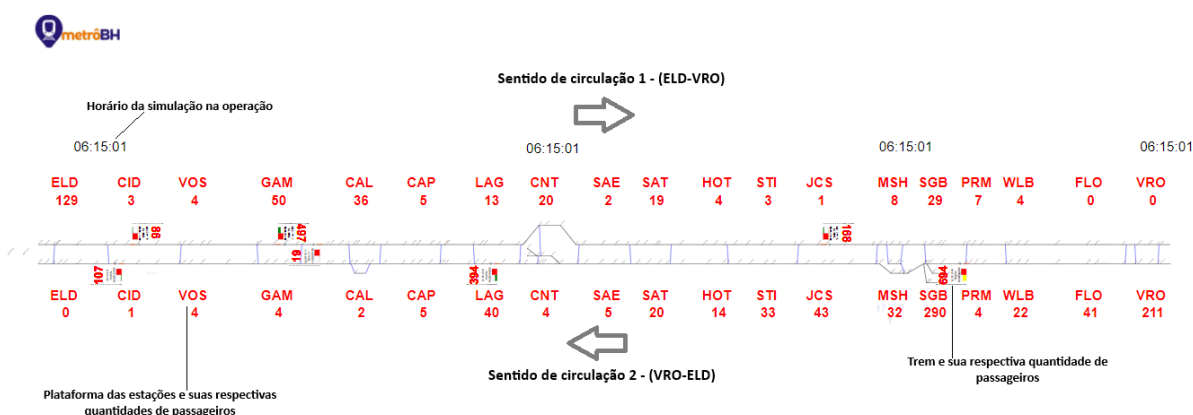


Figura 7: Interface de visualização dinâmica da linha operando no AnyLogic

Sentido 1

Horário	ELD	CID	VOS	GAM	CAL	CAP	LAG	CNT	SAE	SAT	HOT	STI	JCS	MSH	SGB	PRM	WLB	FLO	VRO
06:15	129	3	4	50	36	5	13	20	2	19	4	3	1	8	29	7	4	0	0
06:30	14	54	31	26	6	2	2	0	9	49	8	28	27	12	14	2	1	0	0
06:45	585	18	11	13	1	9	17	82	6	33	1	9	5	24	47	4	3	0	0
07:00	97	5	28	3	15	19	4	76	2	2	2	32	23	10	34	1	3	1	0
07:15	55	7	55	33	10	5	6	0	14	35	17	22	14	13	7	0	7	5	0
07:30	357	33	12	6	2	34	13	141	20	15	19	3	4	23	32	4	2	1	0
07:45	60	10	11	5	26	14	6	134	4	2	0	35	40	16	25	5	3	0	0
08:00	55	1	49	34	5	1	2	0	26	32	3	19	17	6	6	1	11	3	0
08:15	286	16	20	14	8	20	12	114	10	11	4	5	4	18	27	2	1	2	0
08:30	117	13	1	9	23	21	14	69	14	1	0	27	17	8	21	2	0	1	0
08:45	153	9	1	41	15	10	4	1	2	26	6	9	6	1	6	1	0	2	0



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

Sentido 2

Horário	ELD	CID	VOS	GAM	CAL	CAP	LAG	CNT	SAE	SAT	HOT	STI	JCS	MSH	SGB	PRM	WLB	FLO	VRO
06:15	0	1	4	4	2	5	40	4	5	20	14	33	43	32	290	4	22	41	211
06:30	0	3	9	5	0	0	3	7	17	2	2	17	23	14	752	28	73	124	94
06:45	0	2	4	5	4	3	45	17	13	55	15	31	88	6	244	9	47	69	587
07:00	0	0	12	6	2	9	13	17	0	9	10	20	96	30	472	2	16	27	238
07:15	0	2	5	10	0	10	3	7	15	56	34	4	131	33	578	63	83	0	60
07:30	0	0	0	3	6	26	4	5	13	14	23	47	187	18	494	8	74	42	471
07:45	0	6	1	2	4	14	30	29	4	1	22	27	234	68	692	3	22	46	308
08:00	0	2	9	1	3	1	8	6	28	39	41	1	238	41	662	27	103	2	49
08:15	0	0	0	0	1	15	2	3	4	13	9	22	269	9	628	7	27	61	253
08:30	0	0	0	0	2	8	31	18	6	4	2	18	242	32	146	5	14	39	143
08:45	0	1	0	0	2	7	21	11	34	27	8	5	210	23	259	11	41	12	83

Figura 8: Ocupação das Plataformas – Sentido 1 (Vilarinho -VRO) e Sentido 2 (Eldorado - ELD) – Pico Manhã (07:00 às 08:45)

A análise de lotação dos passageiros, da Figura 8, nas estações durante o pico da manhã considerado, das 07:00 às 08:45, revela um comportamento dinâmico e oscilatório no terminal Eldorado (ELD) no Sentido 1. É importante destacar que a estação Eldorado, juntamente com a estação Vilarinho (VRO), constitui uma das duas maiores estações em fluxo de usuários de todo o sistema, conforme é mostrado na Figura 9. Apesar dessa alta concentração de demanda, os dados mostram que a plataforma de Eldorado não atinge níveis críticos de superlotação de forma contínua, mantendo o controle de passageiros na plataforma.

ELD	CID	VOS	GAM	CAL	CAP	LAG	CNT	SAE	SAT	HOT	SAI	JCS	MSH	SGB	PRM	WLB	FLO	VRO
15.557	1.612	2.514	3.531	3.239	6.600	4.893	8.122	7.118	3.666	2.194	2.943	3.338	3.645	6.417	1.298	2.336	2.081	13.236

Figura 9: Embarque diário de um dia útil da Linha 1 do Metrô BH

Em contrapartida à fluidez obtida no trecho atendido pelo carrossel curto (Eldorado a Central), a estação São Gabriel (SGB) no Sentido 2 consolidou-se como o gargalo mais severo do sistema durante o pico da manhã. São Gabriel é uma das maiores estações em volume de



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

usuários do metrô, integrando um terminal de ônibus de grande porte, e naquela região o *headway* de atendimento era de longos 22 minutos devido à restrição física da via singela. Esse intervalo estendido é severamente agravado pela geometria da estação, que possui plataformas laterais paralelas e não centrais (tipo ilha). Esse arranjo físico limita drasticamente a área operacional útil disponível, fazendo com que o acúmulo contínuo de usuários crie rapidamente condições severas de superlotação e desconforto na plataforma.

Essa dinâmica de represamento em São Gabriel é explicada pelo fluxo de trens que parte de Vilarinho (VRO). Na tabela da Figura 8, o estoque de passageiros na plataforma de VRO apresenta oscilações bruscas a cada intervalo de medição: são 587 usuários às 06:45, 238 às 07:00, 60 às 07:15 e 471 às 07:30. Essa alternância sistemática indica que as composições conseguem escoar a plataforma na partida, porém iniciam a viagem já na capacidade limite de projeto.

Como os trens já partem em capacidade máxima de Vilarinho, ao chegarem a São Gabriel eles já se encontram fisicamente saturados e sem espaço para o embarque de novos usuários. Isso justifica o motivo de a plataforma de São Gabriel apresentar uma curva de acúmulo de passageiros que apenas cresce de acordo com a faixa horária (saltando de 244 às 06:45 para 472 às 07:00, 578 às 07:15, e mantendo patamares críticos até atingir o ápice de 692 às 07:45). Incapazes de embarcar nas composições que passam cheias, os usuários em São Gabriel ficam retidos na plataforma lateral estreita, gerando o represamento crônico registrado pelo modelo e evidenciando o impacto do gargalo operacional da via singela.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

5.1.2. Pico Tarde

O monitoramento da movimentação de passageiros no pico da tarde, compreendido entre 17:00 e 20:00, também foi mapeado a partir de extrações diretas do AnyLogic a cada 15 minutos de simulação. Esses registros temporais permitiram quantificar os passageiros em cada estação e em cada sentido de embarque. Os resultados desta consolidação estão representados termicamente na Figura 10, evidenciando as flutuações e as zonas de maior pressão por demanda ao longo do final do dia.

Sentido 1

Horário	ELD	CID	VOS	GAM	CAL	CAP	LAG	CNT	SAE	SAT	HOT	STI	JCS	MSH	SGB	PRM	WLB	FLO	VRO
17:00	156	24	30	27	15	12	4	94	107	59	23	14	11	11	3	7	8	0	0
17:15	83	1	9	4	119	192	53	92	85	35	20	12	3	68	47	17	4	3	0
17:30	82	6	39	50	80	5	20	12	211	140	74	61	70	48	31	8	9	1	0
17:45	234	25	27	17	12	8	23	388	135	135	100	32	53	63	52	21	14	6	0
18:00	76	0	29	31	49	154	44	356	268	152	139	45	109	118	44	3	7	1	0
18:15	129	0	63	36	33	19	22	115	454	192	176	17	72	90	11	2	0	2	0
18:30	144	21	12	12	22	11	26	611	654	193	177	10	5	87	33	14	5	2	0
18:45	69	7	19	20	62	118	19	472	888	164	177	24	39	130	33	10	5	0	0
19:00	106	6	0	33	28	39	1	21	1095	218	207	28	15	72	14	5	1	0	0
19:15	1	1	9	2	2	20	3	264	1100	210	202	5	7	3	0	7	3	1	0
19:30	17	1	0	9	1	56	11	222	798	205	209	0	15	26	18	0	0	0	0
19:45	51	4	1	1	18	9	2	37	309	196	236	5	16	13	14	2	1	0	0
20:00	2	0	18	15	13	59	6	11	383	236	245	4	2	14	0	0	5	0	0

Sentido 2

Horário	ELD	CID	VOS	GAM	CAL	CAP	LAG	CNT	SAE	SAT	HOT	STI	JCS	MSH	SGB	PRM	WLB	FLO	VRO
17:00	0	1	4	3	13	3	25	45	66	11	16	21	2	9	27	8	23	5	166
17:15	0	0	1	11	6	57	105	28	33	6	10	8	15	56	77	0	2	13	78
17:30	0	9	5	3	36	3	21	28	116	4	13	5	9	33	52	15	31	1	22
17:45	0	7	3	5	3	20	40	5	112	25	36	16	17	26	11	13	16	29	346
18:00	0	1	1	16	8	69	144	137	34	8	8	2	18	73	0	2	3	15	204
18:15	0	6	7	3	13	15	56	93	149	34	1	0	8	19	21	15	11	2	35
18:30	0	6	0	5	30	5	6	3	116	30	11	7	19	26	23	11	13	12	169
18:45	0	3	0	3	7	66	81	214	17	5	19	5	14	61	7	3	8	7	133
19:00	0	4	5	6	9	33	58	83	163	19	1	3	2	46	48	17	26	2	48
19:15	0	0	1	1	11	5	14	23	90	9	6	9	0	17	10	1	6	6	127
19:30	0	0	0	4	3	41	65	7	24	3	2	5	1	38	6	2	4	5	55
19:45	0	0	3	9	4	15	19	147	109	8	1	1	0	23	19	7	9	1	21
20:00	0	0	6	6	13	3	14	14	68	9	8	10	0	8	5	2	4	5	157

Figura 10: Ocupação das Plataformas – Sentido 1 (Vilarinho -VRO) e Sentido 2 (Eldorado - ELD) – Pico Tarde (17:00 às 20:00)



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

A análise da quantidade de passageiros no terminal Eldorado (ELD) no Sentido 1, durante o pico da tarde, revela uma operação altamente equilibrada, mesmo diante da forte atração de viagens característica do fim do dia. Ao contrário de uma curva ascendente de retenção, os dados da Figura 10 mostram flutuações rápidas e esvaziamentos constantes na plataforma, que oscila de 156 usuários às 17:00 para 234 às 17:45, recuando imediatamente para 76 às 18:00. Esse padrão demonstra que a estratégia de injetar trens vazios na linha a partir de Eldorado a cada 10 minutos também foi eficiente neste pico, impedindo que o fluxo de entrada de passageiros se acumule de forma desordenada no início do trecho.

Por outro lado, o cenário mais crítico de restrição de capacidade desloca-se para a estação Santa Efigênia (SAE) no Sentido 1. Embora essa estação conte com uma plataforma central única (tipo ilha) — o que em tese facilita a distribuição física dos usuários —, a área útil de circulação torna-se insuficiente para conter a enorme demanda proveniente da região hospitalar de Belo Horizonte combinada com o estrangulamento da oferta de trens. Com a restrição operacional de via singela ativa no trecho entre Minas Shopping e Santa Tereza, o *headway* de atendimento no pico da tarde também foi de 22 minutos, gerando um efeito de represamento que supera a capacidade física de escoamento da plataforma.

5.2.1 Taxa de Ocupação por Viagem do Programa Horário

A análise da taxa de ocupação máxima registrada por viagem ao longo do dia, apresentada nos gráficos de desempenho dos carrosséis, permite avaliar o nível crítico de carregamento que cada composição atinge em seu ponto de maior pressão. Como o eixo X desses gráficos



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

está estruturado de forma cronológica — em que as viagens com numeração menor ocorrem nos primeiros horários do dia —, é possível mapear com exatidão os picos de carregamento extremo que ocorrem nos turnos da manhã e da tarde.

5.2.2 Carrossel Longo: Eldorado–Vilarinho (ELD-VRO) — Headway de 22 Minutos

O comportamento do carregamento máximo no carrossel longo, que realiza o atendimento de ponta a ponta da linha com um intervalo de 22 minutos, revela um cenário crítico de saturação física em ambos os sentidos de circulação, conforme os dados consolidados na Figura 11.

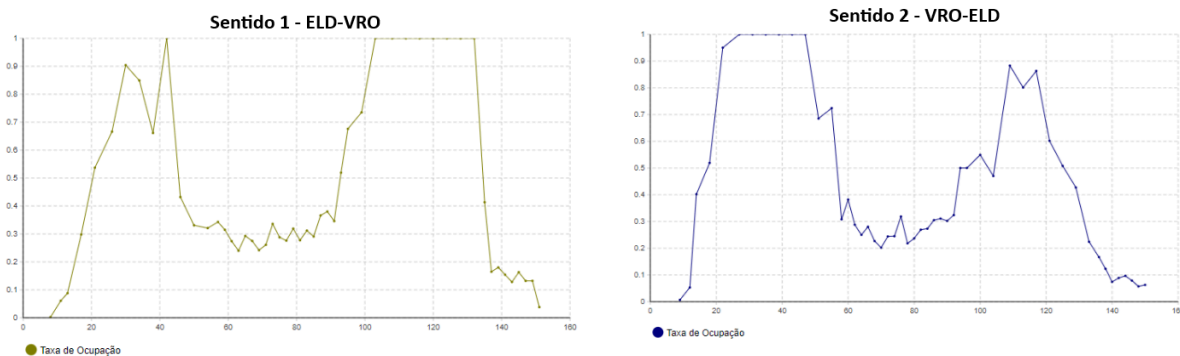


Figura 11: Gráficos de Taxa de Ocupação do Carrossel Longo - Sentido 1 e Sentido 2

- **Sentido 1 (Eldorado para Vilarinho):**

No pico da manhã, a taxa de ocupação máxima sobe rapidamente, atingindo 90% na viagem 30 e alcançando a saturação total de 100% (capacidade limite de 1.000 passageiros) na viagem 42. O cenário mais alarmante, contudo, ocorre no pico da



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

tarde. A partir da viagem 105 até a viagem 132, o gráfico exibe uma continuidade de 100% de ocupação durante essas viagens. Esse congelamento no limite máximo de projeto comprova que o intervalo de 22 minutos é incapaz de escoar a demanda reprimida, resultando em trens que circulam completamente lotados por quase duas horas seguidas.

- **Sentido 2 (Vilarinho para Eldorado):**

O pico da manhã apresenta o quadro operacional mais grave neste sentido. A ocupação máxima dispara de forma quase vertical, atingindo 100% já na viagem 25 e mantendo-se saturada até a viagem 48. Esse comportamento reflete o represamento de passageiros na estação terminal Vilarinho e o gargalo em São Gabriel discutidos anteriormente: com intervalos de 22 minutos, as composições preenchem toda a sua capacidade útil logo nas primeiras estações do percurso. No pico da tarde, o sentido inverso também registra forte carregamento, com a ocupação máxima atingindo o ápice de 88% na viagem 110, conforme os dados consolidados na Figura 11.

5.2.3 Carrossel Curto: Eldorado–Central (ELD-UCT) — *Headway* de 10 Minutos

A implementação do carrossel curto, operando com um intervalo reduzido para 10 minutos no trecho de maior carregamento da linha, altera drasticamente o cenário de saturação dos trens. Ao aproximar a oferta de viagens da demanda real de passageiros, as taxas de ocupação máxima caem para patamares muito mais seguros e confortáveis, conforme mostra a Figura 12.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

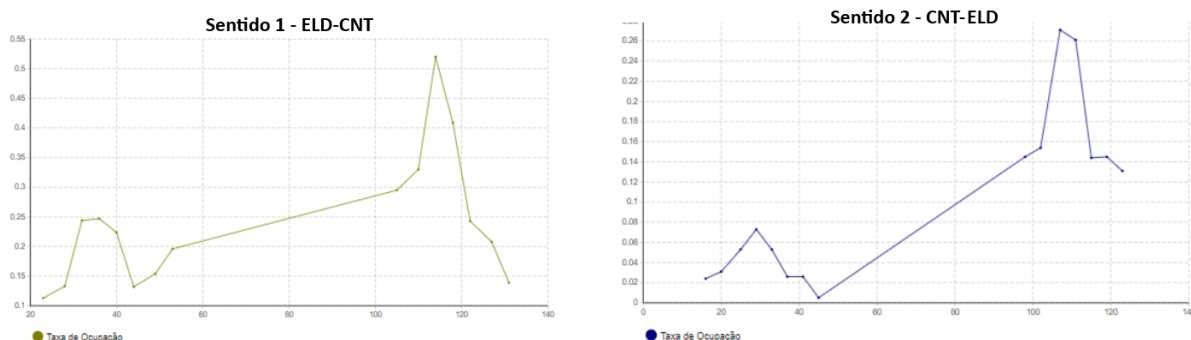


Figura 12: Gráficos de Taxa de Ocupação do Carrossel curto - Sentido 1 e Sentido 2

- **Sentido 1 (Eldorado para Central):**

Com a injeção frequente de composições a cada 10 minutos, o escoamento a partir de Eldorado torna-se altamente fluido. No pico da manhã (região da viagem 36), a taxa de ocupação máxima não ultrapassa os 25%. Mesmo no pico da tarde, momento em que a demanda atinge o seu patamar mais elevado no dia, a ocupação máxima alcança o ápice de apenas 52% na viagem 114. Esse resultado indica que as composições operam com ampla folga de capacidade, sem qualquer registro de superlotação ou desconforto físico para os passageiros ao longo do trajeto.

- **Sentido 2 (Central para Eldorado):**

O reflexo da maior oferta de transporte também se faz presente no sentido inverso do carrossel curto. Durante o pico da manhã, a taxa de ocupação máxima atinge um valor residual de apenas 7% na viagem 30. No pico da tarde, as viagens apresentam



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

uma elevação gradativa condizente com o fluxo de retorno para as estações finais de destino, atingindo a ocupação máxima de 27% entre as viagens 107 e 111.

6. CONCLUSÕES

O desenvolvimento e a aplicação do modelo de simulação computacional no software AnyLogic consolidaram-se como uma resposta científica e altamente eficaz ao desafio de planejar a operação do Metrô de Belo Horizonte em períodos de transição institucional e investimentos pesados em infraestrutura. Diante do severo cenário de restrição física imposto pela intervenção em via singela entre as estações Santa Tereza e Minas Shopping em novembro de 2025, a ferramenta demonstrou que as tomadas de decisão na engenharia de transportes devem abandonar abordagens puramente empíricas e migrar definitivamente para o planejamento estritamente baseado em dados.

A inovação metodológica do trabalho reside na quebra de paradigma ao integrar os dados reais e massivos do sistema de bilhetagem eletrônica para a modelagem dinâmica da Matriz Origem-Destino (OD) por faixas horárias. Essa abordagem superou a limitação histórica do planejamento ferroviário tradicional — que se balizava apenas pelo volume bruto de passageiros entrantes por estação —, permitindo ao simulador prever matematicamente a distribuição espacial exata dos usuários pelos sentidos da via, pelas plataformas e no interior de cada composição ao longo da Linha 1.

Os resultados práticos do modelo geraram diagnósticos operacionais de extrema relevância para a garantia do Nível de Serviço e da segurança do sistema. A simulação revelou de forma



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

inequívoca que o programa horário executado sob um headway de 22 minutos no carrossel longo (Eldorado–Vilarinho) satura as composições em seu limite de projeto de 1.000 passageiros (100% de ocupação máxima) por extensos períodos nos horários de pico. Em contrapartida, a simulação do carrossel curto (Eldorado–Central) com intervalo de 10 minutos comprovou-se viável para conter o colapso do trecho de maior carregamento, mantendo a ocupação máxima das composições em patamares seguros e confortáveis de até 52% no pico da tarde e 25% no pico da manhã.

Ademais, o modelo cumpriu com precisão o objetivo de balancear as restrições de tráfego com a dinâmica de segurança nas estações. Ao identificar que a grade horária regular de partidas seria insuficiente a partir das 07h00 no pico da manhã, a simulação determinou a necessidade técnica de inserção de viagens extras a partir das 07h15 no trecho Vilarinho–Central. O diagnóstico visual e preditivo mapeou os pontos críticos de acúmulo e risco de queda nas plataformas, apontando as estações Vilarinho, São Gabriel e Waldomiro Lobo como os focos de saturação no turno da manhã, e as estações Central, Santa Efigênia e Santa Tereza no turno da tarde.

Como contribuição para trabalhos futuros e desdobramentos práticos na engenharia metroferroviária, sugere-se a expansão do modelo computacional desenvolvido para integrar sistemas de controle ativo do fluxo de passageiros nos bloqueios de acesso (catracas) e a incorporação de uma lógica de sinalização ferroviária mais robusta. Essa evolução deve ser capaz de modular dinamicamente os códigos de velocidade ao longo dos circuitos de via



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

(CDVs) em resposta direta ao posicionamento em tempo real das composições. A implementação de códigos de velocidade intermediários no simulador permitirá reproduzir com maior fidelidade o espaçamento dinâmico e o comportamento operacional praticado na operação diária, superando a premissa conservadora adotada neste estudo de aplicar restrição absoluta (código zero) no CDV imediatamente anterior ao trem ocupante.

Adicionalmente, recomenda-se parametrizar curvas físicas detalhadas contendo as taxas reais de aceleração e frenagem do material rodante sob diferentes condições de carregamento de passageiros. Para refinar ainda mais a modelagem do carrossel, propõe-se que o simulador passe a extrair e aplicar os tempos de percurso de forma individualizada para cada composição de trem ativa na linha, em substituição à metodologia de tempos médios históricos utilizada no presente trabalho. Essa abordagem microscópica permitirá capturar as pequenas variações de desempenho mecânico e desgaste que ocorrem naturalmente entre os diferentes trens da frota durante as viagens.

Por fim, sugere-se o desenvolvimento de uma lógica de programação que permita injetar e alternar diferentes tipos de frotas na via de acordo com uma sequência operacional preestabelecida (como a partida alternada de trens das frotas A, B e C). Enquanto o modelo atual trata todas as unidades como uma frota única e homogênea, essa nova funcionalidade possibilitará simular com precisão o impacto de misturar composições de diferentes gerações, comprimentos, acelerações ou capacidades no mesmo carrossel. Essa flexibilidade



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

computacional será indispensável para avaliar a estabilidade do sistema sob restrições físicas em cenários reais de transição tecnológica e renovação de frota.

Em suma, a modelagem integrada provou ser uma poderosa ferramenta de suporte à decisão. Ao munir a gerência operacional com relatórios quantitativos e visualizações dinâmicas em 2D de alta fidelidade, o trabalho atinge com pleno êxito seus objetivos gerais e específicos, demonstrando que é possível executar cronogramas agressivos de modernização ferroviária sem que o usuário final sofra com a perda de confiabilidade, segurança e dignidade no transporte público de alta capacidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRANTES, D. G. et al. Analysing capacity and operational bottlenecks in urban rail systems. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, v. 14, p. 100-112, 2020.

ALSGER, A. et al. Validating smart card data for destination estimation in transit networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 70, p. 305-320, 2016.

ANTP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. Relatório de Informações Sócio-Ambientais do Setor de Transporte Público Coletivo Urbano de Passageiros. São Paulo: ANTP, 2023.

ANPTRILHOS – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES DE PASSAGEIROS SOBRE TRILHOS. Balanço do Setor Metroferroviário Brasileiro 2024/2025. Brasília: ANPTRILHOS, 2025.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

BAGCHI, M.; WHITE, P. R. The potential of smart card data for passenger profiling in public transport. *Transport Policy*, v. 12, n. 1, p. 57-74, 2005.

BORSHCHEV, A. *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic*. Chicago: AnyLogic North America, 2013.

BURDETT, R. L.; KOZAN, E. Techniques for estimating the capacity of railway lines. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 40, n. 8, p. 616-632, 2006.

CASCETTA, E. *Transportation Systems Analysis: Models and Applications*. 2. ed. Springer Science & Business Media, 2009.

CORMAN, F. et al. Real-time railway traffic management: dispatching, fleet management and passenger delay mitigation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 40, p. 301-314, 2014.

FRUIN, J. J. *Pedestrian Planning and Design*. New York: Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, 1971.

GOMES, A. L. S. et al. Concessões e parcerias público-privadas no setor metroferroviário brasileiro: desafios de modernização e eficiência. *Revista Transportes*, v. 29, n. 2, p. 45-58, 2021.

GOVERDE, R. M. P. et al. Three-stage procedure for robust railway timetabling with single-track bottlenecks. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 89, p. 1-18, 2016.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

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

HARRIS, N. G. Train dwell time models and capacity of urban passenger railways. *Journal of Transportation Engineering*, v. 132, n. 11, p. 881-889, 2006.

HELBING, D.; FARKAS, I.; VICSEK, T. Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, v. 407, n. 6803, p. 487-490, 2000.

HELBING, D.; MOLNÁR, P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, v. 51, n. 5, p. 4282, 1995.

HOOGENDOORN, S. P.; BOVY, P. H. L. State-of-the-art of pedestrian flow modeling. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, v. 1, n. 2, p. 169-182, 2001.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2022: Primeiros Resultados de População e Domicílios. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

KLÜGL, F.; BAZZAN, A. L. C. Agent-based modeling and simulation in transportation. *AI Magazine*, v. 33, n. 3, p. 29-40, 2012.

LAM, W. H. K. et al. Pedestrian flow characteristics in Hong Kong passenger terminals. *Transportation Research Record*, v. 1828, p. 56-62, 2003.

LAW, A. M. *Simulation Modeling and Analysis*. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, v. 4, n. 3, p. 151-162, 2010.

MUNIZAGA, M. A.; PALMA, C. Estimation of a transit origin-destination matrix from smart card data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 24, p. 9-18, 2012.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



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

NIKOLSKIS, A. et al. Multi-agent simulation of railway network and passenger flows. Transportation Research Procedia, v. 37, p. 322-329, 2019.

NOURI, F. et al. Simulation of pedestrian crowd dynamics on railway platforms under disrupted conditions. Safety Science, v. 149, p. 105-119, 2022.

ORTÚZAR, J. de D.; WILLUMSEN, L. G. Modelling Transport. 4. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

PELLETIER, M.-P. et al. Smart card data in public transit planning: A review. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 19, n. 4, p. 557-568, 2011.

PUSHKAREV, B.; ZUPAN, J. M. Urban Space for Pedestrians. Cambridge: MIT Press, 1975.

SCHADSCHNEIDER, A. et al. Evacuation dynamics: Empirical results, modeling and applications. Encyclopedia of Complexity and Systems Science, p. 3142-3176, 2009.

SERIANI, S.; FERNANDEZ, R. Pedestrian traffic management of boarding and alighting in metro stations. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 53, p. 78-92, 2015.

SEYFRIED, A. et al. Empirical data for pedestrian flow through bottlenecks. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, v. 372, n. 2, p. 282-297, 2006.

SPIESS, H.; FLORIAN, M. Optimal strategies: A new assignment model for transit networks. Transportation Research Part B: Methodological, v. 23, n. 2, p. 83-102, 1989.

STILL, G. K. Crowd Dynamics. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia de Computação) – University of Warwick, Coventry, 2000.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS

TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB. Highway Capacity Manual - HCM 2010.

Washington, D.C.: TRB, 2010.

UITP – UNION INTERNATIONALE DES TRANSPORTS PUBLICS. World Metro Figures. Brussels:

UITP, 2023.

VAN DEN HEUVEL, J. P. et al. Modeling train dwell time and passenger boarding and alighting dynamics in high-frequency metro lines. Transportation Research Part B: Methodological, v. 125, p. 23-41, 2019.

VUCHIC, V. R. Urban Transit Systems and Technology. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

ZHAO, J. et al. Estimation of travel destinations using smart card data for public transit. Transportation Research Record, v. 2006, p. 1-10, 2007.