

Relação do Tempo de Ocupação das Estações com o Headway em Sistemas Metroviários usando Simulação Computacional – Aplicação no Sistema Metroviário do Rio de Janeiro

Relation of Station's Occupancy Time with Headway in Metro Systems Using Computational Simulation – Application on Rio de Janeiro Metro System

¹André Rodrigues de Carvalho, ²Fábio Alves, ³Hostílio Xavier Ratton Neto, ⁴ Juliane Bender

¹Mestrando em Engenharia de Transportes no Programa de Engenharia de Transportes da COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (andre.carvalho@pet.coppe.ufrj.br)

²Mestrando em Engenharia de Transportes no Programa de Engenharia de Transportes da COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (fabio.alves@pet.coppe.ufrj.br)

³Professor Associado do Programa de Engenharia de Transportes da COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (hostilio@pet.coppe.ufrj.br)

⁴ Mestrando em Engenharia de Transportes no Programa de Engenharia de Transportes da COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (bender@pet.coppe.ufrj.br)

RESUMO: Este trabalho possui o objetivo de modelar a relação entre o Headway e o Tempo de ocupação de estações em sistemas metroviários na faixa de horário crítico de demanda. Através do modelo de simulação de tráfego construído em Arena® foi possível simular o que acontece com o Headway frente à criação de cenários diferentes de tempos de ocupação de estações ferroviárias e prever o tempo total de viagem do trem em sistemas reais. Para isso, um modelo matemático que relacione o Headway com o tempo de ocupação foi formulado para o sistema Metrô Rio com base na simulação computacional a partir de dados reais coletados do sistema. De posse do modelo de simulação e do modelo matemático é possível prever tempo total de viagem e Headway médio do sistema, para condições de tempo de ocupação de estação e tempo de circulação entre estações pré-estabelecidos. A aplicação do método proposto permitiu encontrar possibilidades de melhoria em tempo total de viagem e no headway do sistema metrô Rio. Conclui-se que existe uma relação entre headway e tempo de ocupação que se bem conhecida e controlada pode gerar uma melhoria no desempenho do sistema. Espera-se que esse método possa contribuir nas futuras análises do desempenho de sistemas metroviários contemporâneos.

Palavras Chave: Tempo total de viagem; simulação metroviária; Faixa horária de pico.

ABSTRACT: This paper has the goal of modeling a relationship between the Headway and the station occupancy time on metro systems on critical time range. Through a traffic simulation model built in Arena® was possible to simulate what happens with Headway in the face of the creation of some scenarios of subway stations occupancy time and predict the total trip time in real systems. A mathematical model that shows the relationship of headway with occupancy time will be formulated for the Metro Rio System with bases on computational simulation of real data of the system. In possess of the simulation model and the mathematical model it is possible to predict the total trip time and the average headway of the system. The method application allows found improvement possibilities in Total trip time and headway at Metro Rio system .The conclusion is that was possible modelling a relationship between headway - occupational time that if well-known and controlled, can generate a better performance of the system. There is an expectancy with the contribution of this method for analyzes of performance of contemporary metro systems.

Keywords: Total trip time, subway simulation, subway and peak hour range

1. INTRODUÇÃO

Centenas de milhares de pessoas transitam entre origens e destinos diferentes todos os dias utilizando os sistemas metroviários. Por outro lado, acredita-se que existe uma demanda reprimida considerável em virtude da oferta de metrôs não acompanharem a atratividade de viagens nas grandes metrópoles mundiais tais como São Paulo, Rio de Janeiro, Nova York, Tóquio, Londres entre outras.

Nestas cidades, o embarque e desembarque de passageiros nas plataformas tende a ser maior nos horários de pico, o que pode acarretar em plataformas e metrô superlotados. Estas evidências levam a acreditar que caso a qualidade e oferta do sistema de metrô fossem superiores, esta acomodaria uma parcela maior da demanda total de transporte, promovendo a migração de outros modais para o sistema de metrô. Contudo, promover o aumento de capacidade metroviária é algo extremamente dispendioso, por isso, antes de qualquer investimento, torna-se necessário aplicar as técnicas de planejamento, objetivando promover estudos visando melhorar a oferta de trens por hora no sistema, principalmente por meio de melhorias operacionais.

Assad (1979), pioneiro no campo de pesquisas de eficiência e capacidade de sistemas ferroviários, teorizou que os atrasos que ocorrem nos pátios de cruzamento contribuem negativamente para o tráfego de um sistema ferroviário. Em ferrovias de carga, estes atrasos podem ocorrer devido às atividades de manobra nos pátios de cruzamento onde os trens em sentidos opostos cruzam-se e assim uma regra de prioridade deve ser estabelecida para determinar qual trem pode cruzar e qual deve esperar no pátio, ocasionando esperas que resultam em atrasos na programação estabelecida na grade de trens. Este conceito, bastante disseminado em ferrovias de carga, será explorado neste trabalho para ferrovia de passageiros, pois entendeu-se que as manobras que ocorrem nas estações e o tempo que elas levam, influenciam no tempo total de trânsito e, por consequência, no *Headway*.

Os sistemas metroviários são compostos por vias de uso compartilhado entre a circulação livre dos trens e o embarque/desembarque de passageiros. Nas vias de circulação a velocidade é maior, sujeita as condições da própria via e habilidade do maquinista. Já nos trechos de estações, a velocidade é limitada para o trem poder parar alinhado à plataforma e sair com velocidade limitada também. A entrada do trem na estação é controlada por sinalização, seguido pelo desembarque e embarque e posterior saída do trem da estação por meio de outro sinal. Essas são situações de tráfego, muito comuns no dia a dia da operação metroviária, foram implantadas em um modelo de simulação discreta no software Arena®, para testar diferentes cenários de tráfego metroviário e contribuir para testar a hipótese que o tempo de ocupação influencia no headway.

Por último, uma aplicação no sistema Metrô Rio foi realizada com o intuito de validar o modelo de simulação. Neste, foi possível demonstrar como o modelo pode ser calibrado pelo tempo total de viagem. Atrasos e adiantamentos no tempo de ocupação das estações do cenário calibrado foram implementados no modelo para gerar os cenários modificados (paralelos ao cenário calibrado). Os parâmetros headway, tempo de ocupação da estação e tempo total de viagem são saídas do modelo de simulação. O objetivo do trabalho é atingido nas últimas seções quando se propõe um modelo matemático que relacione o Headway com o tempo de ocupação de plataforma de embarque e desembarques com base nos dados da simulação de cenários.

2. REVISAO DA LITERATURA

Diversos trabalhos têm se preocupado com os conflitos gerados pela enorme diversidade de interações possíveis que ocorrerem na circulação de trens, pautando suas soluções em modelos para reprogramar inteiramente uma grade de trens (Cordeau et al., 1998, Dunder e Sahin, 2012, Marin et al., 2013).

Para Xun et al. (2013), o controle do Headway em sistemas ferroviários é resolvido usando sistemas auxiliares que operem junto com o sistema ATO (Controle Automático de Trens), definindo qual a melhor velocidade para o trem operar em cada situação. Contudo, embora controlar a velocidade dos trens economize energia de frenagem, esta abordagem não

resolve os problemas que causam atrasos nos trens e após chegar a um limite de performance o sistema de sinalização e controle ATO ou mesmo o CBTC não permitem mais que o headway seja reduzido para minimizar tempos de viagens. Isso pode ser visto nos trabalhos de Aly et al. (2016), onde foi realizada uma análise do desempenho de um corredor ferroviário egípcio utilizando simulação computacional com diferentes cenários empregando tecnologias como seção de bloqueio móvel, controle automático de trens, CBTC, mudança na prioridade de trens e sistemas de informação aos passageiros nas estações de embarque. O diagnóstico da sua análise incorreu que o problema de atrasos na grade ocorria nas estações, sobretudo nas interseções entre linhas e em todos os cenários. Quando a melhoria de informações foi implementada nas estações, o tempo total de viagens foi menor quando comparados com os que não tinham esta melhoria.

Outros trabalhos na área, como os realizados por Fu e Dessouky (2016) apresentam um modelo de programação linear inteira para prever o headway dinâmico, ou seja, aquele que ocorre em função dos conflitos de circulação, atrasos e encontro de trens em cruzamentos que mudam instantaneamente. Contudo, são trabalhos focados em ferrovias de carga e poucos trabalhos se propõem a estabelecer a relação entre tempo de ocupação de plataforma e o headway entre os trens em sistemas de metros urbanos, como o proposto neste trabalho. Nas próximas seções apresenta-se as definições dos parâmetros tempo de trânsito, headway, tempo de ocupação tratados na literatura científica de transportes.

2.1 Tempo de trânsito

No âmbito de ferrovias de uso compartilhado, Petersen (1974) propôs um conjunto de equações analíticas para modelar o tempo de trânsito de uma origem a um destino para situações de cruzamento de trens com diferentes prioridades em ferrovias de carga. A proposta de Petersen leva em consideração que o tempo de trânsito de trem pode ser calculado como a soma do seu tempo de circulação livre mais o período de tempo em que um trem foi obrigado a parar por influência de outro trem.

2.2 Headway (H)

O headway em sistemas de transportes é definido como o tempo entre dois veículos consecutivos medidos entre faces frontais dos veículos. Esse tempo é necessário para que não ocorram acidentes entre os veículos. Segundo Nabais (2014), em sistemas ferroviários, esse tempo leva em consideração a velocidade dos trens, o tamanho da seção de bloqueio, o tamanho do trem e o tempo necessário para que seja reconhecida a sinalização atual da via (equação 1 e 2).

$$H = \frac{3B + L + C}{V} + t \quad (1)$$

$$B = L_1 + L_2 + L_3 \quad (2)$$

em que B – comprimento da seção de bloqueio (em metros); L_1 – espaço de corrida livre em metros, isto é, a distância percorrida pelo segundo trem entre o envio do sinal de posição emitido pelo trem que está à frente ao controle de tráfego centralizado (CTC) e o recebimento, pelo trem que vem atrás, do sinal emitido pelo CTC; L_2 – distância de frenagem em metros, isto é, a distância percorrida pelo trem para reduzir a velocidade da máxima autorizada pelo sinal da seção de bloqueio anterior para a máxima autorizada na seção de bloqueio em que se encontra o trem à frente; L_3 – distância em metros percorrida pelo segundo trem entre a emissão de seu sinal de posição e a configuração de sua posição no CTC; L – comprimento do trem (em metros); C – distância mínima necessária ao reconhecimento de sinal (em metros); t – tempo mínimo necessário à mudança de sinal (em segundos); e V – velocidade máxima do trem (em metros por segundos).

Ocorre que, quando o trem da frente para em uma estação para embarque e desembarque, o trem de trás deve se manter afastado o suficiente para evitar acidentes, porém isso afeta o headway, pois o trem irá reduzir velocidade até parar aguardando a desobstrução à frente ou se manterá em movimento, porém em velocidade menor.

Neste trabalho, estes modelos analíticos não serão usados, pois são modelos determinísticos. O Headway, o tempo de ocupação e o tempo de trânsito variam conforme as solicitações impostas ao sistema pela demanda de transporte, variando continuamente no tempo. Uma das formas de modelar estas situações é através de simulação de eventos discretos (SANTOS, 2014), onde o Headway pode ser coletado como um resultado da simulação desde que conhecida a distribuição de probabilidades que gera o tempo de ocupação das estações, a entrada dos trens no sistema e o tempo total de viagem pode ser previsto.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para melhor compreensão do modelo de simulação, introduz-se o conceito intuitivo de tempo de ocupação de plataforma metroviária definido pela Equação 3:

$$TO = Tc + Tp + Ts \quad (3)$$

em que TO é o tempo de ocupação; Tc o tempo de chegada do trem, contado do momento que o trem avança o semáforo de entrada da plataforma até parar; Tp o tempo de trem parado na plataforma (inclui o tempo de embarque/desembarque); e, Ts o tempo de saída do trem da plataforma, contado desde a posição de repouso do trem até a saída completa do trem pelo semáforo de saída.

Baseando-se no controle dos atrasos estudados em Petersen (1974) e na simulação de melhorias encontrados nos cenários pesquisados por Aly (2016), criou-se um Modelo computacional no software Arena com intuito de simular a operação metroviária com compartilhamento de linhas e com presença de diferentes ramais. Destaca-se que esta situação é comumente encontrada nos sistemas metroviários presentes em metrópoles do mundo globalizado.

Para utilização do modelo, este precisa ser calibrado pela variável mais sensível as variações de headway e tempo de ocupação. Estas duas variáveis afetam diretamente o tempo total de viagem (TTV) entre origem e destino, pois conforme apresentado no trabalho de Krueger (1999), o tempo de trânsito entre origens e destinos de uma linha de circulação deve ser adequado ao planejamento operacional, representado na grade de trens, sobre pena do sistema, operar abaixo da capacidade de tráfego instalada. Em virtude disso, o tempo total de viagem (TTV), medido em minutos no sistema real, foi o parâmetro conhecido utilizado para calibrar o modelo de simulação.

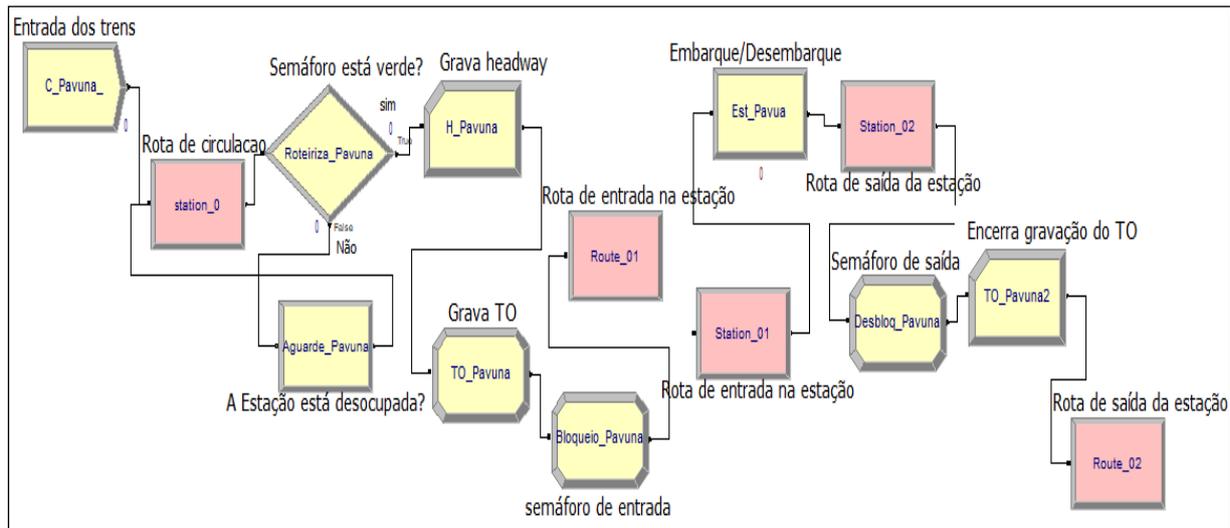
O modelo foi simulado para aplicação no sentido de maior demanda dentro da faixa horária de pico (FHP). Os dados coletados na saída do modelo foram headway entre trens em cada estação para diversos cenários de tempo de ocupação, TTV no sistema e o Tempo de Ocupação da estação (TO).

3.1 Modelo de simulação computacional Arena

Arena® é um software de simulação de eventos discretos que possui aplicação nas pesquisas de transporte metroviário para simular situações de tráfego com restrições e parâmetros diversos. Os modelos são construídos na forma de fluxogramas e os tempos de realização de cada processo são definidos pelo usuário.

O modelo geral simplificado com uma única estação é apresentado na Figura 1 com intuito de demonstrar a anatomia do modelo para uma linha de circulação com origem e destino únicos.

Figura 1 - O modelo de simulação com uma única estação.



Fonte: Autoria própria

Para utilização do modelo, os seguintes passos precisaram ser seguidos:

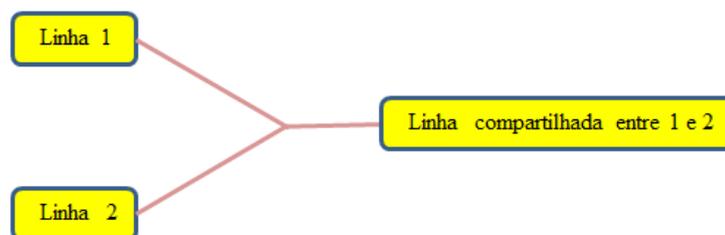
1. A entrada do trem no sistema se dá por meio do bloco “entrada dos trens” que possui uma lógica de frequência de entradas determinada pelo usuário;
2. O trem é enviado direto para uma rota ilustrativa que possui fins de animação, ou seja, sem contagem de tempo de circulação;
3. O trem avança para o bloco de decisão intitulado “a Estação está ocupada?” que representa a decisão tomada pelo controle de tráfego centralizado (CTC), onde o trem só segue se a plataforma da estação da frente estiver desocupada; em caso de ocupação da estação, o trem aguarda na linha de circulação gerando fila e o tempo de espera é computado no tempo total de viagem;
4. Ao avançar sobre a estação, o bloco “grava Headway”, computa o tempo entre trens;
5. O avanço sobre o bloco “contador de tempo de ocupação” inicia a contagem do TO, esse bloco representa o sinal de entrada da estação;
6. Um sinal de bloqueio da estação é emitido para o bloco de decisão na entrada da estação;
7. O processo de entrada, embarque e desembarque da estação e saída foi simplificado no bloco “plataforma” o qual é antecedido e precedido por rotas e estações para fins de animação;
8. Ao avançar sobre o bloco “sinalizador de desbloqueio” o trem desocupa a estação;
9. Imediatamente após o trem desocupar a estação, o tempo de ocupação é medido e contabilizado para posterior análise em relatório de saída do modelo, assim como o headway medido na entrada da estação; e,
10. O trem sai pelo bloco “via de circulação de saída” obedecendo ao tempo definido pelo usuário para sair do sistema ou avançar para próxima estação que possui a mesma lógica demonstrada nestes 10 passos.

A entrada dos trens em um sistema metroviário dificilmente é realizada com tempo entre chegadas constante e admite-se, neste trabalho, que ela ocorrerá através de uma distribuição de probabilidade que será apresentada mais à frente. O mesmo ocorrerá com a interação do trem com as estações durante as paradas para embarque e desembarque.

Ao colocar os dados de entrada no modelo de simulação, o usuário deverá considerar uma distribuição de probabilidades de tempos de ocupação igual para todas as estações que estejam na mesma linha, desde que regido pelo mesmo sistema de sinalização e controle.

Admite-se nesta modelagem, a existência de outros sistemas em que trens diferentes compartilham a mesma via mesmo tendo origens diferentes. Para este caso, o encontro das linhas ocorre em uma estação cuja, a regra de entrada do trem, novamente, é a plataforma não estar ocupada. O modelo ilustrativo de simulação deste caso é apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Modelo ilustrativo com duas linhas unindo-se em uma única via compartilhada



Fonte: autoria própria

A Figura 2 é um esquema ilustrativo da junção de duas linhas em uma única linha compartilhada. As linhas são compostas pelo encadeamento de diversos modelos de estação única (Figura 1) que são colocados lado a lado para compor a linha. É possível notar na Figura 1 que não aparecem blocos com funções de medir o TTV, pois o tempo da entidade no sistema é um parâmetro pré-fixado do software Arena, não havendo necessidade de ser programado no modelo.

3.1.1 Limitação do modelo

A circulação do trem na via foi configurada no modelo como o tempo médio de deslocamento entre estações, embora isso nem sempre seja verdade. Existem situações extraordinárias que fazem com que o tempo de ocupação dos trens nas estações aumente muito e se desvie da média. Porém isso acontece em acidentes ou obstruções não planejadas que fogem do padrão operacional do sistema.

O modelo considera seções de bloqueio apenas onde existem estações, com isso os trens consecutivos modificam sua velocidade e param apenas por existir um trem parado na estação à frente o que nem sempre é verdade. Em operações reais os trens podem circular com velocidades diferentes na via entre estações e até parar quando o headway entre os trens é tão pequeno que comprometa a segurança. No entanto, no modelo proposto, este problema é minimizado com a adoção do tempo médio de circulação como um dado de entrada do bloco responsável pelas rotas visto que entendeu-se que a média englobará as reduções de velocidade e os períodos nos quais os trens estão parados aguardando desobstrução do tráfego à frente.

Nos casos de obstruções de tráfego que alterem demasiadamente a regularidade do tráfego, o modelo gerará filas e não cumprirá sua missão de permitir uma análise da relação do headway com o tempo de ocupação de maneira satisfatória. Assim, assumindo as hipóteses adotadas anteriormente é possível demonstrar que o modelo para condições normais de tráfego funciona adequadamente, conforme será demonstrado mais à frente.

3.2 Aplicação do modelo de simulação – Sistema Metroviário do Rio de Janeiro

O sistema metroviário da cidade do Rio de Janeiro foi escolhido pelos autores para aplicar o modelo de simulação. É importante ressaltar que a Metrô Rio presta serviço de qualidade e eficiência à sociedade carioca e não foi provocada a ceder dados para o estudo,

3.2.1 Dimensionamento do tamanho da amostra de calibração

O modelo de simulação necessita ser calibrado com uma amostra que represente um dia típico de operação do sistema do metrô Rio dentro da faixa horária de pico matinal (FHP). A busca por um dia representativo envolveu um dimensionamento da amostra necessária, a ser coletada dos 4 parâmetros de interesse:

- Frequência de entrada dos trens nas estações de origem Uruguai e Pavuna;
- Tempo Total de Viagem (TTV) dos trechos de Uruguai – Botafogo e Pavuna – Botafogo;
- Tempo de viagem entre estações; e,
- Tempo de Ocupação das estações

Para o cálculo das amostras mínimas necessária de cada parâmetro, seguiu-se a equação 4 (Levin, 1987):

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{(N - 1) \cdot e^2 + Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)} \quad (4)$$

em que n é o tamanho da amostra; N é o universo populacional; Z o desvio do valor médio para alcançar o nível de confiança adotado.

Para calcular a frequência de entrada dos trens no sistema adotou-se Z=1,96 (95%), e = 5% para a margem de erro admitida e p=50% (proporção de trens que operam dentro de um regime conhecido). O resultado é expresso no Quadro 1, revela que é necessário realizar a pesquisa da frequência de entrada na estação Pavuna 52 vezes e na Uruguai 73 vezes.

Quadro 1 – Dimensionamento da amostra de campo para encontrar as frequências de entrada.

Dimensionamento	Pavuna	Uruguai
Frequência estimada (minutos/trem)	3	2
Tempo operacional (minutos)	180	180
Universo em 3 horas (trens)	60	90
Nível de confiança	95%	95%
Erro	5%	5%
Z	1,96	1,96
Proporção de trens	50%	50%
Tamanho da amostra (n)	52	73
Dias de pesquisa	10	10
n. de campo	5	7

Fonte: autoria própria

A Equação 4 foi aplicada novamente para o parâmetro de interesse: tempo total de viagem e tempo de ocupação e os resultados são apresentados no quadro 2 e Quadro 3, respectivamente.

O quadro 2 revela que o tamanho da amostra para estimar o tempo total de viagem para linha 1 é n= 67 e para linha 2 é n= 52.

Quadro 2 – TTV entre Uruguai – Botafogo (Linha 1) e Pavuna – Botafogo (Linha 2).

Dimensionamento	Linha1	Linha2
TTV estimado (minutos)	27	60
Ciclo operacional (minutos)	54	120
Nrº de ciclos do trem no tempo da FHP	3,33	1,50
TTV máximo na FHP (em minutos)	81,00	60,00
Nível de confiança	95%	95%
Erro	5%	5%
Z	1,96	1,96
Proporção de trens	50%	50%
Tamanho da amostra (n)	67	52
Dias de pesquisa	30	30
n de campo	2,3	1,8

Fonte: autoria própria

O tamanho da amostra para estimar o tempo de ocupação é apresentado no quadro 3 e revela que é necessário uma amostra $n= 51$ em cada estação da linha 1 e $n= 61$ para o tempo de ocupação diário em cada estação da linha 2. As amostras do tempo de ocupação das estações foram dimensionadas para serem coletadas em 10 dias consecutivos de pesquisa nos dias úteis (segunda a sexta-feira) operacionais do Metrô Rio.

Quadro 3 – Dimensionamento do tamanho da amostra referente aos tempos de ocupação em cada estação.

Dimensionamento da Amostra	Linha1	Linha2
Tempo médio de ocupação estimado (minutos)	1,5	1,5
Tempo para completar um ciclo (minutos)	74	120
Nrº de ciclos do trem na FHP	2	2
Quantidade de estações	16	32
Tempo de ocupação total em 3 horas	73	59
População estimada em 3 horas	73	59
Nível de confiança	95%	95%
Erro	5%	5%
Z	1,96	1,96
Proporção de trens que seguem o tempo médio de ocupação de 1,5 min	0,5	0,5
Tamanho da amostra (n)	51	61
Dias de pesquisa	10	10
n de campo em cada estação	5	6

Fonte: autoria própria

3.2.2 Método de coleta de dados

Três observadores (A, B e C) foram contratados para identificar os parâmetros de interesse durante os períodos de pesquisa. A pesquisa foi realizada durante os meses de janeiro e fevereiro de 2017, quando ainda não havia trens partindo da Pavuna ou Uruguai com destino a linha 4. Isso foi importante, pois havia necessidade de restringir o escopo da pesquisa às linhas 1 e 2 sem o efeito da linha 4. Foram realizadas pesquisas apenas de segunda à sexta-feira, na FHP da manhã das 6 às 9 horas nas linhas 1 e 2 do metrô Rio. Nos sentidos Pavuna – Botafogo e Uruguai – General Osório. Os dados de entrada foram levantados seguindo a metodologia descrita na sequência.

3.2.2.1 Frequência de entrada dos trens no sistema

Os observadores A e B ficaram posicionados nas estações Pavuna e Uruguai, respectivamente, com o semáforo de entrada da estação à vista. Eles mediram por meio de um cronômetro o tempo de entrada dos trens nas estações durante 10 dias úteis. Para Pavuna e Uruguai foram realizadas 5 e 7 medições por dia, respectivamente. Utilizando a ferramenta *Input Analyzer* presente no Programa Arena foi possível descrever o tempo de entrada dos trens nas estações terminais do sistema por meio das Equações 5 e 6:

$$\text{Pavuna} - 2 + 3,85.Beta(\text{média } 0,296; \text{desvio padrão } 0,404) \quad (5)$$

$$\text{Uruguai} - \text{Normal} (\text{média } 1,98; \text{desvio padrão } 0,108) \quad (6)$$

os termos entre parênteses referem-se a média e desvio padrão respectivamente. Essas aproximações foram programadas no bloco “entrada dos trens” do modelo de simulação.

3.2.2.2 Tempo total de viagem (TTV)

Determinada a frequência de entradas dos trens, o próximo passo consistiu em alocar os observadores em viagens com Origem Pavuna e Uruguai e destino Botafogo. Por meio de cronômetros, os observadores A, B embarcaram na Pavuna em trens distintos e mediram o TTV durante 23 dias úteis (Quadro 4). Em paralelo, o observador C embarcou na estação Uruguai foi até Botafogo levantando 3 medidas por dia durante 23 dias (Quadro 5).

Quadro 4 – Tempo total de viagem coletado no fluxo Pavuna – Botafogo.

Dia da pesquisa	Pavuna - Botafogo (minutos)			Média
1º	77	68	56,7	68,4
2º	67,5	69	64,4	Máx
3º	65,6	66,4	72	73,6
4º	75	65,7	73	Mín
5º	73,4	69	63,2	63,3
6º	61,2	73,5	67	
7º	69	62	72	
8º	71,7	70	76	
9º	75	67,3	59,8	
10º	75,8	65,4	65	
11º	68,5	66,7	59	
12º	77	75	69	
13º	70,4	69	65	
14º	71,7	68,5	62	
15º	62,5	67	69	
16º	61	79	59,9	
17º	73	67	65	
18º	61	73	62,3	
19º	65	74	71	
20º	68,5	70	69,9	
21º	59	68	69,5	
22º	75	61,5	72	
23º	72	76	73	

Fonte: autoria própria

Quadro 5 – TTV's medidos pelos observadores A, B e C no fluxo Uruguai- Botafogo.

Dia da pesquisa	Pavuna - Botafogo (minutos)			Média
1º	77	68	56,7	68,4
2º	67,5	69	64,4	Máx
3º	65,6	66,4	72	73,6
4º	75	65,7	73	Mín
5º	73,4	69	63,2	63,3
6º	61,2	73,5	67	
7º	69	62	72	
8º	71,7	70	76	
9º	75	67,3	59,8	
10º	75,8	65,4	65	
11º	68,5	66,7	59	
12º	77	75	69	
13º	70,4	69	65	
14º	71,7	68,5	62	
15º	62,5	67	69	
16º	61	79	59,9	
17º	73	67	65	
18º	61	73	62,3	
19º	65	74	71	
20º	68,5	70	69,9	
21º	59	68	69,5	
22º	75	61,5	72	
23º	72	76	73	

Fonte: autoria própria

Obteve-se 69 amostras para cada linha de circulação. A média e os desvios máximos e mínimos são apresentados nos quadros 4 e 5. Estes dados foram usados para calibrar o modelo de simulação.

3.2.2.3 O tempo de ocupação

Após concluir a pesquisa TTV, os observadores A e B posicionaram-se nas estações da linha 2 e fizeram 6 medições diárias de tempo de ocupação em cada estação durante 10 dias. Para este intuito, foi importante que os observadores estivessem posicionados em local que permitissem a visualização dos semáforos de entrada e saída das estações com vistas a poder observar a entrada da composição do trem na estação, bem como a sua saída. Analogamente, 5 medições diárias foram feitas pelo observador C na linha 1 em cada estação durante 10 dias. Usando novamente a ferramenta input analyzer do software Arena foi possível encontrar as seguintes distribuições para cada ramal do sistema linha1 e linha 2 do metrô Rio por meio das Equações 7 a 9:

$$\text{Uruguai – Praça Onze: } 0,999 + 0,551. \text{ Beta (média } 1,33; \text{ desvio padrão } 0,352) \quad (7)$$

$$\text{Pavuna - Cidade Nova: } 0,999+0,571. \text{ Beta (média } 1,33; \text{ desvio padrão } 0,352) \quad (8)$$

$$\text{Central – Botafogo: } 0,999+0,221. \text{ Beta (média } 1.33; \text{ desvio padrão } 0.352) \quad (9)$$

assumiu-se que cada ramal do sistema receberia a contribuição dos valores gerados pelas Equações 7 a 9 em cada bloco “*plataforma*”, obedecendo ao ramal ao qual a estação pertence. Para esta pesquisa, a divisão entre os três ramais faz sentido, a partir do momento que existem

sistemas diferentes de sinalização e controle na linha 1 e 2 e o compartilhamento de linhas entre Central e Botafogo

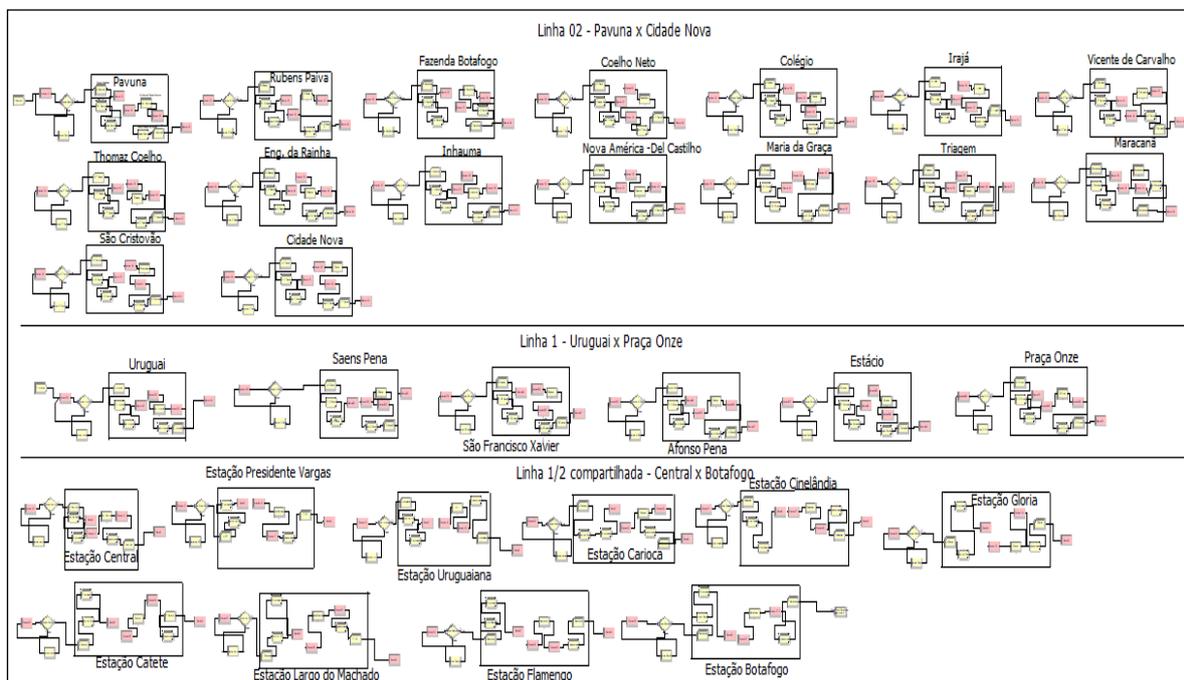
3.2.2.4 Tempo entre estações

Durante a pesquisa TTV, usando um cronômetro extra por observador, foi possível medir o tempo entre estações durante os 23 dias de pesquisa, o que permitiu gerar uma grande quantidade de dados para linha 1 e 2. A média dessas observações em cada trecho de via entre estações foram alocadas nos blocos *route* que tem a função de representar as vias entre estações. O valor médio encontrado foi de 2 minutos com desvio padrão de 1 minuto. Os limites inferior e superior de 1 e 3 minutos para o tempo entre estações deram flexibilidade para realizar a calibração no modelo. O tempo entre estações foi o único termo modificado para calibrar o modelo de simulação. Considerou-se o modelo calibrado, quando o TTV para ambas as linhas estivessem dentro da faixa da amostra coletada em campo, conforme apresentado nos quadros 4 e 5.

3.3 Rodando o modelo de simulação

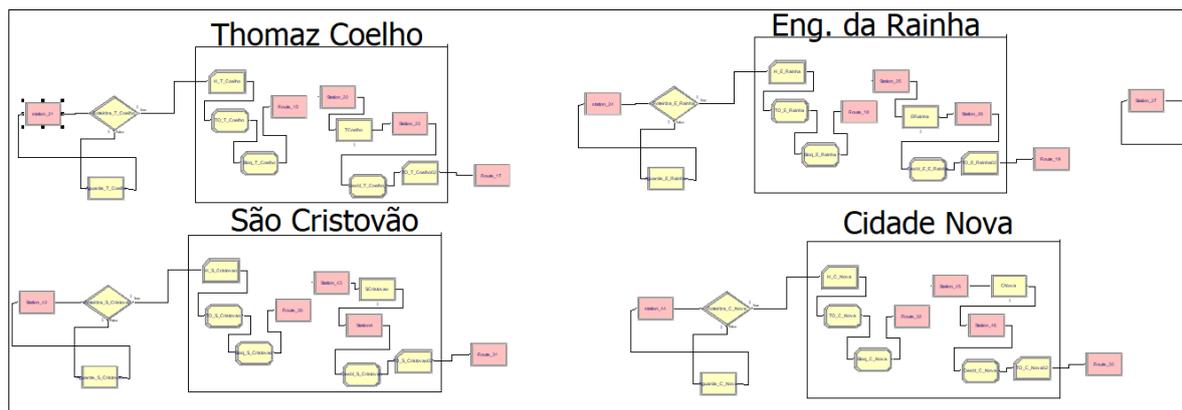
O modelo de simulação para o Metrô Rio usa a mesma lógica apresentada anteriormente para o modelo com uma única estação, porém, o modelo foi ampliado para comportar as 32 estações divididas em 3 ramais, a saber: Pavuna – Cidade Nova, Uruguai – Praça Onze e Central – Botafogo, conforme pode ser visto na Figura 4, e na visão ampliada do modelo Figura 5 e 6.

Figura 4 – Visão macroscópica do modelo do Metrô em 3 ramais - Pavuna – Cidade Nova; Uruguai – Praça Onze e Central – Botafogo.



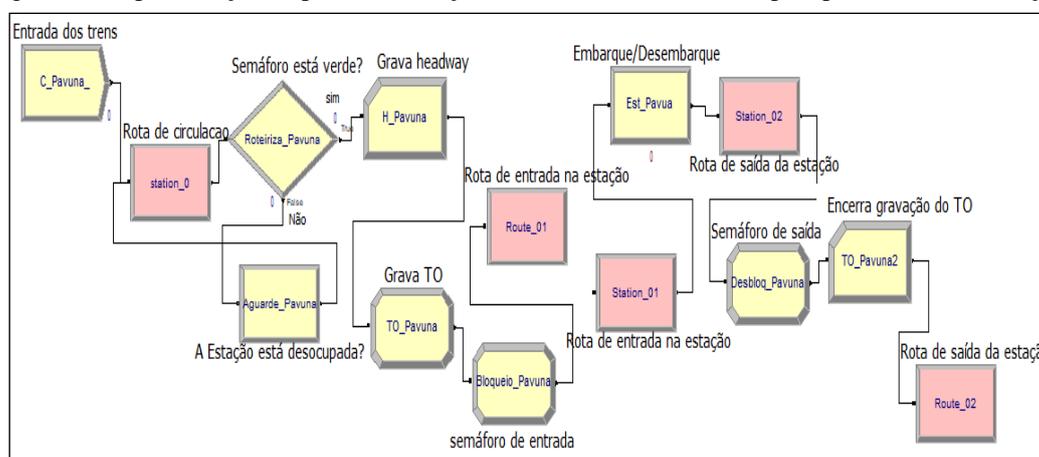
Fonte: Autoria própria

Figura 5 – Representação ampliada da parte da linha 1 do sistema.



Fonte: Autoria própria.

Figura 6 – Representação ampliada da estação Pavuna (este modelo se repete para as demais estações)



Fonte: Autoria própria

As estações são modelos de estação única (Figura 6), encadeados por um bloco de rota que dá prosseguimento ao tráfego do trem no sistema. Isso significa que o modelo de simulação é composto basicamente por 32 submodelos que ligam-se por blocos de rota que direcionam o trem das origens Pavuna e Uruguai para Estação Central e de lá os trens atingem o mesmo destino em Botafogo.

3.3.1 Simulação 1 - Cenário base para calibração do modelo

O cenário base se utiliza dos dados amostrais coletados em campo. Nele foram imputados as Equações 5 a 9, as quais representam o modelo de funcionamento do sistema de metro do Rio observado em campo. O modelo foi simulado com 30 repetições com tempo de aquecimento do sistema de 30 minutos em cada vez para aguardar a entrada em regime normal de operação.

O Tempo total de viagem, o Headway e o tempo de ocupação são outputs do modelo. Destaca-se que o Cenário base calibrado considera que a media entre tempo total de viagem possa ficar compreendida dentro dos limites estabelecidos para amostra de campo. O parâmetro tempo entre estações foi usado durante essa calibragem. A calibração foi conduzida de tal forma que se permitisse realizar ajustes nos tempos de rota dentro da faixa de 1 minuto a 3 minutos, e nos tempos de ocupação das estações críticas Central, Uruguai e Pavuna, visando encontrar na simulação um TTV entre 63,3 e 73,6min para as viagens de origem na

Pavuna e entre 31,8 e 44,1min para as viagens de origem Uruguai. Este procedimento permitiu calibrar o modelo de simulação com os dados coletados em campo, os resultados serão apresentados na seção resultados e discussões.

3.3.2 Cenários Futuros com Modificações no Tempo de Ocupação

Trata-se de cenários onde o parâmetro a ser modificado é o tempo de ocupação das estações mantendo o tempo entre estações igual ao do cenário calibrado (base). O cenário base gerou como output uma lista de tempos de ocupação das estações, os valores médios destes tempos foram modificados arbitrariamente para gerar 4 cenários futuros paralelos ao cenário base com redução de 0,5 minutos, 1 minuto e acréscimo de 0,5 minutos e 1 minuto nos tempos de ocupação.

Estas subtrações e adições no tempo de ocupação são feitas diretamente no tempo de ocupação apresentados no cenário-base respeitando o limite mínimo de 0,5 minutos para tempos de ocupação e não sendo feita alterações no tempo de ocupação das estações terminais Uruguai e Pavuna, bem como na estação Central.

3.4 Relação do headway e tempo de ocupação do sistema

Assumindo que a operação com CCO e ATO atuando juntos já atingiram uma simbiose que permita poucas perdas em virtude da eficiência no controle de velocidade de trens, pode-se atribuir as diferentes distâncias entre estações, as diferenças percebidas no headway entre ramais Pavuna – Central , Uruguai – Praça Onze e Central – Botafogo do sistema. Desta forma, propõe-se que o headway do sistema e o tempo de ocupação das estações do sistema possam ser assumidos como a média ponderada dos headways médios e tempos de ocupação médios dos ramais, onde os pesos são o número de estações existentes no ramal, conforme representado pelas Equações 5 e 6.

$$H_{sist} = \frac{\sum_1^n N_i H_i}{N_e} \quad (05) \quad e \quad TO_{sist} = \frac{\sum_1^n N_i TO_i}{N_e} \quad (06)$$

em que H_{sist} – headway do sistema; H_i – headway médio do ramal i ; N_e – número de estações do sistema; N_i – número de estações presente no ramal; TO_{sist} – tempo de ocupação médio das estações do sistema; TO_i – tempo de ocupação médio do sistema; i - é o índice do ramal do sistema, para $i= 1, 2, 3... n$, onde n pertencente aos números naturais.

4- RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados do Cenário Base -Calibrado

Para analisar os resultados apresentados no quadro 6 é importante ter em mente que as distâncias entre estações não são constantes e o TTV precisa estar dentro da faixa de tolerância aceitável. Assim, entre os tempos de circulação apresentados, optou-se então pelo cenário com tempo entre estações de 1 ou 3 minutos em virtude de estar dentro da faixa de TTV's encontrada em campo e permitir que estações consecutivas e próximas como Presidente Vargas e Uruguiana fossem representadas com 1 minuto de intervalo médio e as mais distantes entre si, como Maria da Graça e Del Castilho, com 3 minutos de intervalo médio.

Quadro 6- Resultados dos testes de calibração.

Tempo Total de Viagem	Tempo de circulação entre estações (usando 1 e 3 minutos)			Tempo de circulação entre estações (usando 1 e 2 minutos)			Tempo de circulação entre estações de 1 minuto		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
Pavuna – Botafogo	72,5	74,05	75,6	65,89	66,55	67,78	57,86	58,49	59,78
Uruguai – Botafogo	33,35	33,78	35,15	33,65	34,02	35,11	33,65	34	34,95

Fonte: autoria própria

O resultado da simulação deste cenário-base calibrado é apresentado no Quadro 7 com os tempos de ocupação e os headways simulados com as ferramentas presentes no modelo introduzido no software Arena.

Quadro 7 – Cenário base com headway e tempo de ocupação (TO) simulados

Ramais	Estações	Cenário Base		Observação
		Headway	TO	
Ramal (Pavuna x Cidade Nova) 16 estações	Pavuna	3,51	1,51	Headway médio de 3,54 minutos e Desvio padrão de 4%
	Eng. R. Paiva	3,50	1,50	
	Acari/ F.Botafogo	3,45	1,20	
	Coelho Neto	3,45	1,50	
	Colégio	3,50	1,50	
	Iraja	3,54	1,50	
	Vicente de Carvalho	3,58	1,50	
	Thomaz Coelho	3,57	1,50	
	Engenho da Rainha	3,57	1,50	
	Inhaúma	3,59	1,50	
	Del Castilho	3,54	1,50	
	Maria da Graça	3,53	1,50	
	Triagem	3,54	1,50	
	Maracanã	3,59	1,50	
	São Cristóvão	3,57	1,50	
	Cidade Nova	3,53	1,00	
Ramal (uruguai x Praça Onze) 6 estações	Uruguai	1,98	1,20	Headway médio 1,98 minutos e Desvio padrão nulo
	Saens Pena	1,98	1,50	
	S.F Xavier	1,98	1,00	
	Afonso Pena	1,98	1,00	
	Estacio	1,98	1,00	
	Praca Onze	1,98	1,50	
Ramal (Central x Botafogo) 10 estações	Central	1,36	1,20	Headway médio 1,38 minutos e Desvio padrão de 1,6%
	P. Vargas	1,36	1,00	
	Uruguaiana	1,37	1,00	
	Carioca	1,37	1,00	
	Cinelândia	1,37	1,20	
	Gloria	1,38	1,00	
	Catete	1,39	1,20	
	Largo do Machado	1,39	1,00	
	Flamengo	1,40	1,20	
	Botafogo	1,41	1,20	

Fonte: autoria própria

Segundo dados do site Metrô Rio, o headway praticado na linha compartilhada, ou seja, ramal Central – Botafogo, é de 2 minutos e 15 segundos no máximo e nos outros ramais pode chegar a 4 minutos e 30 segundo. Conclui-se que os resultados dos headways para o cenário base estão dentro destes limites, sendo assim o modelo considerado calibrado.

4.2 Resultados dos Cenários Modificados

Os resultados encontrados nos novos cenários simulados são apresentados no Quadro 8, visando extrapolar os resultados encontrados no cenário-base, para além da amostra coletadas em campo e posteriormente permitir a modelagem matemática da relação headway com tempo de ocupação.

Quadro 8 – Headway e tempo de ocupação (TO) simulados nos cenários modicados.

(continua)

Ramais	Redução de 1 min		Redução de 0,5 min		Cenário Base		Aumento de 0,5 min		Aumento de 1 min	
	Headway	TO	Headway	TO	Headway	TO	Headway	TO	Headway	TO
Pavuna x Cidade Nova (16 estações)	3,52	1,51	3,52	1,51	3,51	1,51	3,51	1,51	3,51	1,51
	3,50	0,50	3,50	1,00	3,50	1,50	3,50	2,00	3,50	2,50
	3,47	0,50	3,45	0,70	3,45	1,20	3,45	1,70	3,47	2,20
	3,45	0,50	3,45	1,00	3,45	1,50	3,45	2,00	3,48	2,50
	3,47	0,50	3,47	1,00	3,50	1,50	3,54	2,00	3,55	2,50
	3,47	0,50	3,50	1,00	3,54	1,50	3,57	2,00	3,59	2,51
	3,54	0,50	3,57	1,00	3,58	1,50	3,57	2,00	3,57	2,50
	3,54	0,50	3,60	1,00	3,57	1,50	3,57	2,00	3,57	2,50
	3,58	0,50	3,57	1,00	3,57	1,50	3,59	2,00	3,54	2,50
	3,57	0,50	3,57	1,00	3,59	1,50	3,54	2,00	3,54	2,50
	3,57	0,50	3,59	1,00	3,54	1,50	3,53	2,00	3,57	2,50
	3,57	0,50	3,54	1,00	3,53	1,50	3,54	2,00	3,63	2,50
	3,54	0,50	3,53	1,00	3,54	1,50	3,63	2,00	3,57	2,50
	3,54	0,50	3,53	1,00	3,59	1,50	3,57	2,00	3,53	2,50
	3,54	0,50	3,55	1,00	3,57	1,50	3,53	2,00	3,52	2,50
	3,53	0,50	3,63	0,50	3,53	1,00	3,52	1,50	3,45	2,00
H médio	TO médio	H médio	TO médio	H médio	TO médio	H médio	TO médio	H médio	TO médio	
3,53	0,56	3,54	0,98	3,54	1,45	3,54	1,92	3,54	2,39	
Uruguaí x Praça Onze (6 estações)	1,98	1,20	1,98	1,20	1,98	1,20	1,98	1,70	1,98	1,20
	1,98	0,50	1,98	1,00	1,98	1,50	2,00	2,00	2,50	2,50
	1,98	0,50	1,98	0,50	1,98	1,00	2,00	1,50	2,50	2,00
	1,97	0,50	1,98	0,50	1,98	1,00	2,00	1,50	2,50	2,00
	1,98	0,50	1,98	0,50	1,98	1,00	2,00	1,50	2,50	2,00
	1,98	0,50	1,98	1,00	1,98	1,50	2,00	2,00	2,50	2,50
	H médio	TO médio	H médio	TO médio	H médio	TO médio	H médio	TO médio	H médio	TO médio
	1,98	0,62	1,98	0,78	1,98	1,20	2,00	1,70	2,41	2,03
Central x Botafogo (10 estações)	1,32	1,20	1,34	1,20	1,36	1,20	1,39	1,20	1,64	1,20
	1,33	0,50	1,34	0,50	1,36	1,00	1,60	1,50	2,13	2,00
	1,33	0,50	1,35	0,50	1,37	1,00	1,60	1,50	2,13	2,00
	1,33	0,50	1,36	0,50	1,37	1,00	1,60	1,50	2,14	2,00
	1,34	0,50	1,36	0,70	1,37	1,20	1,77	1,70	2,30	2,20
1,34	0,50	1,36	0,50	1,38	1,00	1,78	1,50	2,30	2,00	

Quadro 8 – Headway e tempo de ocupação (TO) simulados nos cenários modificados.

(conclusão)

Ramais	Redução de 1 min		Redução de 0,5 min		Cenário Base		Aumento de 0,5 min		Aumento de 1 min	
	Headway	TO	Headway	TO	Headway	TO	Headway	TO	Headway	TO
Central x Botafogo (10 estações)	1,34	0,50	1,36	0,70	1,39	1,20	1,78	1,70	2,30	2,20
	1,35	0,50	1,36	0,50	1,39	1,00	1,78	1,50	2,30	2,00
	1,35	0,50	1,37	0,70	1,40	1,20	1,78	1,70	2,30	2,20
	1,35	0,50	1,37	0,70	1,41	1,20	1,79	1,70	2,30	2,20
	H médio	TO médio	H médio	TO médio	H médio	TO médio	H médio	TO médio	H médio	TO médio
	1,34	0,57	1,36	0,65	1,38	1,10	1,69	1,55	2,18	2,00
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
TTV 1	56,34	58,11	63,84	65,61	72,5	75,6	88,05	110,37	99,84	128,21
TTV 2	24,55	26,31	26,35	27,7	33,35	35,15	40,35	65,32	47,35	95,44

Fonte: autoria própria

A simulação de cenários paralelos a um cenário base revelou diferentes possibilidades operacionais para o mesmo sistema. Revelou ainda que a alteração no headway afeta diretamente o tempo de ocupação, porém de maneira diferente para cada ramal. É possível observar afastamento do headway do cenário-base provocado por uma redução de 30 segundos no ramal Uruguai x Praça Onze, sendo que esta redução não é percebida no ramal Central – Botafogo, visto que o headway deste fica menor, embora o desvio seja muito pequeno, de apenas 0,02 minutos. No entanto, nota-se um fenômeno mais acentuado quando se aumenta o tempo de ocupação em 1 minuto, novamente o ramal Uruguai – Botafogo, o que revela um desvio maior do headway para o mesmo cenário visto nos outros ramais. Este comportamento leva a acreditar que cada ramal influenciará o sistema de maneira diferente.

Nota-se que o cenário com redução de 1 minuto no tempo de ocupação com limite mínimo de 30 segundos oferece uma melhoria no tempo total de viagem das linhas 1 e 2. Então, como o cenário de aumento de 1 minuto provoca uma ampliação no TTV, o melhor cenário para operar deve ser aquele que reduza o TTV e que reduza efetivamente o headway. Neste contexto, os cenários de redução de 0,5 minuto e de 1 minuto são promissores. Porém uma análise mais profunda do atendimento a demanda de passageiro precisa ser realizada em pesquisas futuras.

Aplicando as Equações 5 e 6 nos Headways e tempos de ocupação apresentados no Quadro 8, foi possível calcular o Headway e o Tempo de ocupação do sistema para os 5 cenários (Quadro 9).

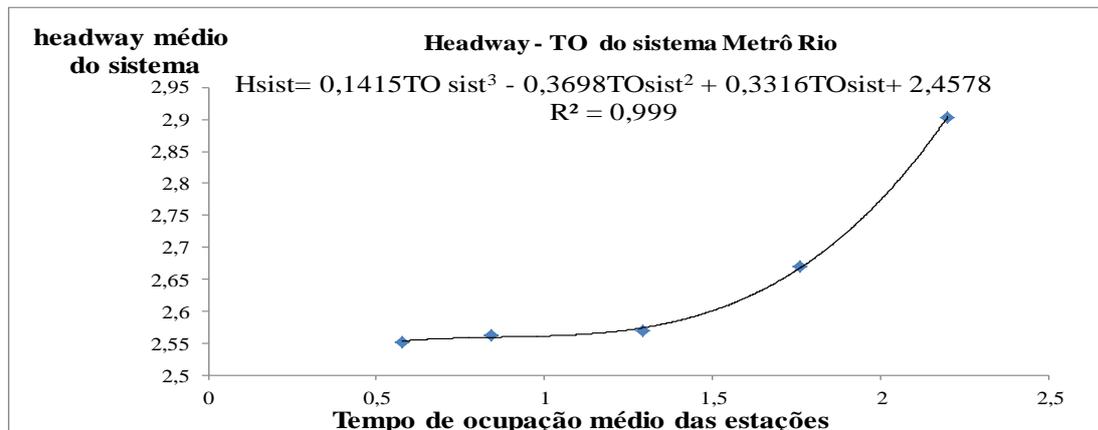
Quadro 9 – Headways e Tempos de ocupação do sistema metrô Rio para 5 cenários.

Sistema	Redução de 1 min		Redução de 0,5 min		Cenário Base		Aumento de 0,5 min		Aumento de 1 min	
	H	TO	H	TO	H	TO	H	TO	H	TO
	2,55	0,57	2,56	0,84	2,57	1,29	2,67	1,76	2,90	2,20

Fonte: autoria própria

Os dados apresentados no quadro 9 foram utilizados para produzir um gráfico que relaciona o tempo ocupação médio das estações com o headway médio do sistema (Figura 5).

Figura 05 – Curva do headway – tempo de ocupação do sistema



Fonte: autoria própria

A equação de predição apresentada na Figura 5 revela um termo constante de 2 minutos e 27 segundos. Valor bastante condizente com o headway oficial mínimo praticado pelo Metrô Rio declarado em seu website de 2 minutos e 15 segundos.

Nota-se que a equação de predição de headway é complementar ao modelo de simulação em Arena ®. O usuário do modelo deve propor tempos de ocupação no modelo em Arena, de modo que forneça o melhor TTV. Posteriormente deve-se usar a equação 6 para calcular o tempo de ocupação do sistema com base nos tempos de ocupação utilizados no ARENA. O último passo é usar a própria equação de predição para encontrar o Headway a ser praticado no sistema.

Os resultados apresentados demonstram uma influência do tempo de ocupação no headway (Figura 5). O quadro 8 ainda revela que as melhorias de tempo de ocupação trazem redução no tempo total de viagem. Esses resultados estão em consonância com os estudos de atrasos de grade de trens propostos em Petersen (1974) e mais recentemente em Feng et al (2017).

Diante dos resultados encontrados pode-se afirmar que reduções no tempo de ocupação médio do sistema podem gerar benefícios substanciais no headway entre os trens e no tempo total de viagem. E isso pode ser implementado se houver uma constata busca pelo controle do tempo de ocupação, obedecendo, uma grade de programação de trens preestabelecida que preveja paradas para embarque e desembarques programadas rigorosamente a qual deve ser seguida de estação a estação de maneira que o tempo de ocupação médio do sistema seja atingido.

5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um modelo polinomial de 3.^a ordem foi utilizado para representar o comportamento do sistema, obtendo 99 % de aderência da curva aos pontos. A equação encontrada relaciona o headway e o tempo de ocupação do sistema. Essa equação pode ser usada para prever o headway do sistema considerando o tempo de ocupação médio do sistema desejado.

O método como um todo torna possível avaliar cenários com diferentes combinações de tempos de ocupação de plataforma, o que pode auxiliar estudos de planejamento tático nos horários de pico.

Confirmou-se a hipótese que o tempo de ocupação influencia o headway médio do sistema bem como tempo total de viagem (TTV).

O cenário modificado com redução de 1 minuto no cenário base e TO médio do sistema de 0,55 minutos permite chegar próximo do limite de performance de 2,55 minutos para o sistema. Por outro lado, um descontrole do tempo de ocupação com aumentos de 0,5 minutos ou 1 minuto no tempo médio de ocupação aumenta o headway piorando a performance o que é muito comum de acontecer dentro da faixa horária de pico da manhã (FHP).

Assim, por meio de simulação foi possível demonstrar que as reduções no tempo de ocupação são capazes de reduzir sensivelmente o TTV. Verifica-se que para reduções de 1 minuto nos tempos de ocupação das estações, obtêm-se um TO médio de 0,58 minutos e uma redução da ordem de 30 % para o TTV1 (Pavuna – Botafogo) e 33 % para o TTV2 (Uruguai – Botafogo) em relação aos TTV's do cenário base. Embora, o Headway médio do sistema tenha mudado pouco, esses resultados reforçam a ideia que um controle efetivo dos tempos de ocupação de plataforma poderia contribuir efetivamente para um aumento da frequência dos trens por meio da redução do headway e da redução do tempo total de viagem na FHP.

Assim como o modelo de simulação foi eficaz em determinar os tempos de ocupação e o headway no sistema pesquisado, recomenda-se que ele seja utilizado como uma ferramenta de gestão com intuito de maximizar a performance do sistema metroviário. Assim, sugere-se que pesquisas futuras sejam realizadas com intuito de propor medidas que efetivamente permitam controlar o tempo de ocupação nas plataformas. Em paralelo deve-se focar também na verificação do quanto às reduções no tempo de ocupação afetam o embarque e desembarque de passageiros.

6- REFERÊNCIAS

ASSAD, A. A. Models for rail transportation. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 14(3):205-220, 1979.

ALY, Mohamed Hafez Fahmy; HEMEDA, Hassan; EL-SAYED, Mohamed Abdelnaby. Computer applications in railway operation. **Alexandria Engineering Journal**, [s.l.], v. 55, n. 2, p.1573-1580, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2015.12.028>.

CORDEAU, Jean-françois; TOTH, Paolo; VIGO, Daniele. A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling. **Transportation Science**, [s.l.], v. 32, n. 4, p.380-404, nov. 1998. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.32.4.380>.

DÜNDAR, Selim; ŞAHİN, İsmail. Train re-scheduling with genetic algorithms and artificial neural networks for single-track railways. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [s.l.], v. 27, p.1-15, fev. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2012.11.001>.

METRÔ RIO. Dúvidas frequentes. Disponível em: [https://www.metrorio.com.br/faleconosco/duvidasfrequente s](https://www.metrorio.com.br/faleconosco/duvidasfrequente%20s)>. Acesso em 1 de ago. 2017.

XUN, J. et al. Cooperative control for train headway adjustment in railway traffic. **IFAC Proceedings Volumes**, 46(25):1-6, 2013.

KRUEGER, H. Parametric Modeling in Rail Capacity Planning. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference, 31, Montreal. Anais... Phoemix: IEEE, 1999. p. 1194 -1200.

LEVIN, J. Estatística aplicada a ciências humanas. 2. ed. São Paulo: Harbra, 1987.

FU, Lunce; DESSOUKY, Maged. Models and algorithms for dynamic headway control. **Computers & Industrial Engineering**, [s.l.], v. 103, p.271-281, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2016.11.030>.

MACDOWELL, F. Visão Técnica Sistêmica, Simpósio do Sindicato Nacional de Empresas de Arquitetura e Engenharia Consultiva (SINAENCO), Rio de Janeiro, 2013.

MARINOV, Marin et al. Railway operations, time-tabling and control. **Research In Transportation Economics**, [s.l.], v. 41, n. 1, p.59-75, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2012.10.003>.

PETERSEN, E. R. Over-the-Road Transit Time for a Single Track Railway. **Transportation Science**, [s.l.], v. 8, n. 1, p.65-74, fev. 1974. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.8.1.65>.

SANTOS, T. A. Um Modelo de Simulação para Análise de Desempenho de Corredores Ferroviários. 2014. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

SHI, Feng et al. Optimizing train operational plan in an urban rail corridor based on the maximum headway function. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [s.l.], v. 74, p.51-80, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2016.11.007>