

32^a

SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

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

Lucas Duarte, Pablo Sousa Pinheiro,
Guilherme Fernando Teixeira Dantas,
Jaqueline Becker da Silva

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas metroferroviários são a espinha dorsal da mobilidade de alta capacidade nas grandes metrópoles mundiais

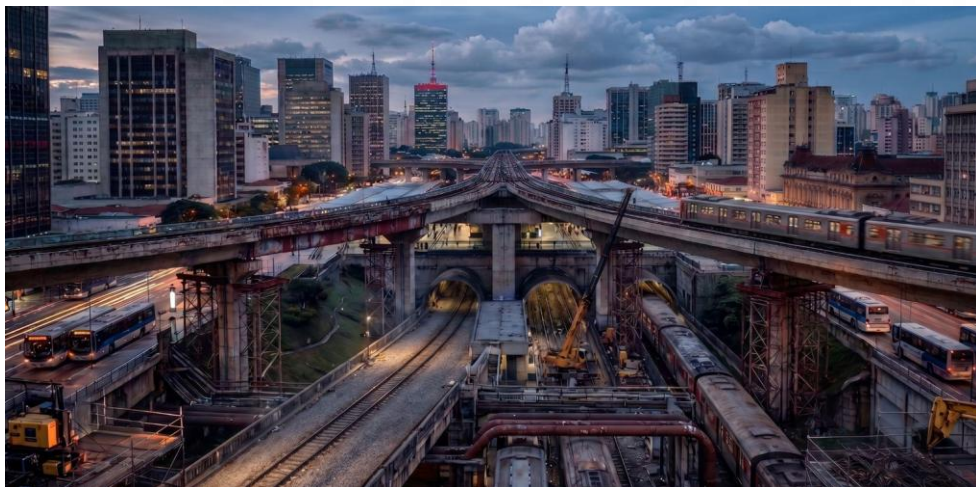
(VUCHIC, 2007).



1. INTRODUÇÃO

CASCETTA (2009)

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.



 Folha de S. Paulo

×

País ganha só 4 km de trilhos em trens e metrô em um ano

Acessar >

A expectativa para a expansão das linhas de trens e metrô no país para 2023 já não era das maiores, mas um levantamento publicado pela ANPTrilhos (Associação Naci...

 CNN Brasil

×

Comporte-se como a chinesa e vence leilão para tirar do papel ...

Acessar >

O grupo venceu o leilão pelo Trem Intercidades (TIC) Eixo Norte, que ligará São Paulo a Campinas. Saiba mais.

 www.gov.br

×

Metrô de Belo Horizonte, em Minas Gerais, é concedido à ...

Acessar >

Ao todo, o investimento projetado é de aproximadamente R\$ 3,7 bilhões ao longo dos 30 anos do contrato. Serão R\$ 2,8 bilhões aportados pelo Governo Federal, R\$ 428...

ANTP (2023)

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.

ANPTRLINHOS (2025)

O país adotou uma tendência de desestatização, transferindo linhas públicas para a iniciativa privada via concessões e Parcerias Público-Privadas.

1.INTRODUÇÃO

Belo Horizonte em

Números



Concentração Urbana

3ª



6.000.000

habitantes da região metropolitana

Habitantes



2,3 milhões



Metrô BH em

Números



Número de composições:

35



Mais de

5700

viagens por mês



4

subestações de energia de tração

25

Trens Série 900 (modernizados)



Mais de

28.1

km de extensão

10

Trens Série 1.000



Horário de Funcionamento:

das 5h15 às 23h

19

Estações



6

Terminais de Integração



Tempo de circulação entre as estações terminais:

47

minutos



Mais de

90.000

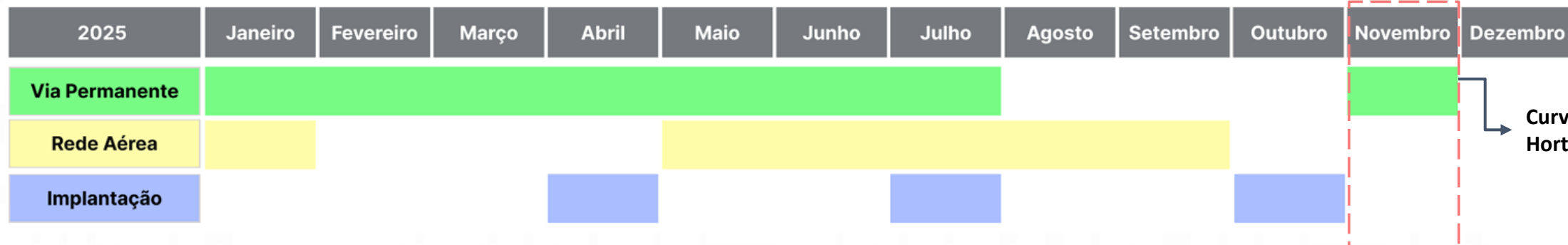
passageiros transportados por dia

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

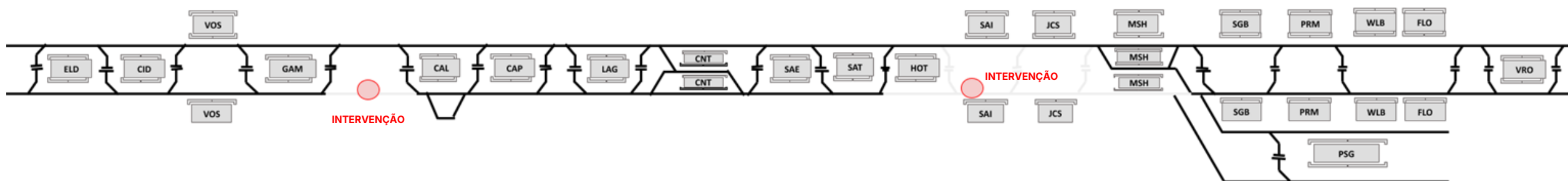
(IBGE,2023).

1. INTRODUÇÃO

Cronograma de revitalizações com impacto operacional



Curva 12-2B
Horto/Santa Inês



🚆 Operação Convencional

🔄 Carrossel 1 (Longo): ELD ↔ VRO (7,5 min).

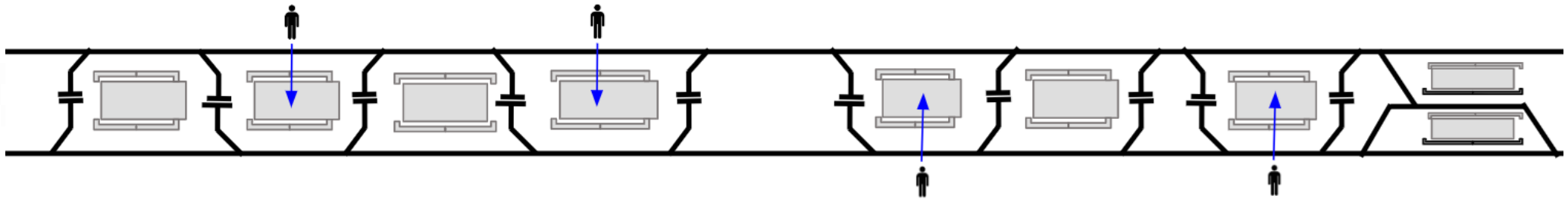


🚆 Operação Crítica Novembro

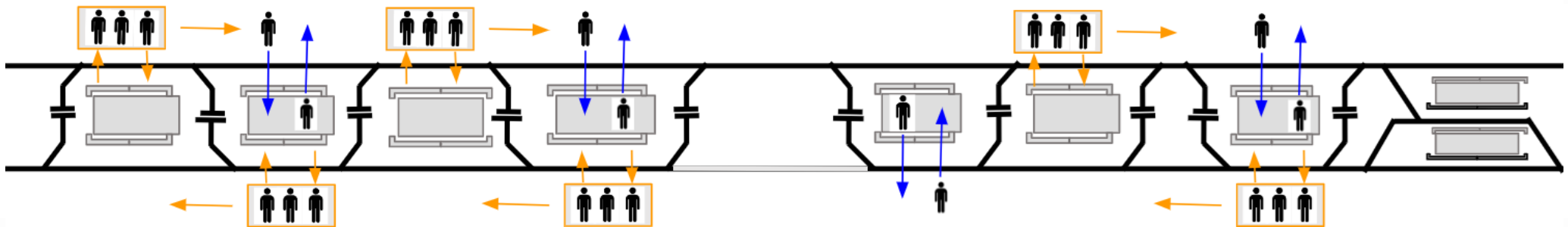
🔄 Carrossel 1 (Curto): ELD ↔ CNT (10 min).
🔄 Carrossel 2 (Longo): ELD ↔ VRO (22 min).

1. INTRODUÇÃO

Planejamento tradicional com dados estáticos de entrada



Planejamento com Matriz Origem Destino



■ OBJETIVO

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.

2.REFERENCIAL TEÓRICO



- Estações em operação
- Estações planejadas
- Linha I em operação
- Trecho Amazonas – Nova Suíça (Integração) - Verde
- Divisa de município
- Rios, lagos
- ✈ Aeroporto



■ 2.1 PLANEJAMENTO OPERACIONAL E GESTÃO DE TRÁFEGO METROFERROVIÁRIO

Oferta vs. Demanda

O planejamento operacional em sistemas de transporte público visa compatibilizar a oferta de assentos à demanda de passageiros.

VUCHIC (2007)

O Papel do Headway

A programação horária é condicionada pelo intervalo entre trens consecutivos. Reduzir esse tempo aumenta a capacidade da linha.

BURDETT & KOZAN (2006)

Gargalos de Sinalização

O limite mínimo do headway é restrito pela tecnologia de sinalização. Restrições reduzem a oferta e sobrecarregam as plataformas.

BURDETT & KOZAN (2006)

Operação em Via Singela

Interdições forçam o compartilhamento do mesmo trilho nos dois sentidos, eliminando a flexibilidade e criando gargalos nos pontos de transição.

GOVERDE ET AL. (2016) | ABRANTES ET AL. (2020)

Atrasos e Superlotação

Atrasos sistemáticos estendem o tempo de espera nas estações, provocando acúmulo e picos instantâneos de superlotação nas plataformas.

CORMAN ET AL. (2014)

Ciclo Vicioso do Dwell Time

Plataforma cheia eleva o tempo de parada (dwell time). O trem atrasa pela plataforma cheia, e ela enche ainda mais pelo atraso do próximo trem.

HARRIS (2006) | VAN DEN HEUVEL ET AL. (2019)

■ 2.2 SISTEMAS DE BILHETAGEM ELETRÔNICA E MODELAGEM DE MATRIZES ORIGEM-DESTINO

Coleta Passiva de Dados

Sistemas de bilhetagem automatizam a captura de demanda ao registrar continuamente os embarques por *smart cards* nos bloqueios das estações.

BAGCHI & WHITE (2005) | PELLETIER ET AL. (2011)

Encadeamento de Viagens

Com catracas apenas na entrada, algoritmos deduzem o destino final a partir do local e horário da validação subsequente do passageiro.

ZHAO ET AL. (2007) | MUNIZAGA & PALMA (2012)

Estruturação da Matriz OD

O processamento dessa base permite montar a Matriz Origem-Destino, organizando matematicamente os fluxos de viagens por intervalos temporais.

ORTÚZAR & WILLUMSEN (2011)

Simulação Computacional

A matriz OD dinâmica é integrada a softwares que cruzam as validações com a grade horária real, replicando a entrada minuto a minuto.

ALSGER ET AL. (2016) | NOURI ET AL. (2022)

Dimensionamento da Oferta

Mapear com precisão os fluxos é essencial para estimar a carga nos trechos críticos da linha e dimensionar a oferta de trens de forma aderente.

SPIESS & FLORIAN (1989)

Previsão de Gargalos

Modelos virtuais preveem com alta fidelidade a formação de acúmulos e superlotação nas plataformas sob cenários de falhas ou restrições.

ALSGER ET AL. (2016) | NOURI ET AL. (2022)

■ 2.3 NÍVEL DE SERVIÇO, DINÂMICA DE LOTAÇÃO E MICROSSIMULAÇÃO PEDESTRE

Nível de Serviço (LOS)

Avalia quantitativamente a qualidade do fluxo em faixas de "A" (livre) a "F" (extrema aglomeração) conforme a densidade de ocupação.

FRUIN (1971)

Distribuição Assimétrica

A demanda distribui-se de forma heterogênea, concentrando usuários próximos aos acessos e aos pontos de parada das portas dos trens.

PUSHKAREV & ZUPAN (1975)

Saturação Localizada

A ocupação desigual cria gargalos severos em pontos específicos da plataforma, enquanto as extremidades permanecem subutilizadas.

STILL (2000)

Quebra de Regularidade

Atrasos na linha e oscilações no *headway* geram um represamento contínuo vindo dos bloqueios, degradando rapidamente o LOS.

LAW ET AL. (2013)

Microsimulação Pedestre

Modelagem computacional baseada em agentes para mapear trajetórias, velocidades individuais e interações físicas na plataforma.

HOOGENDOORN & BOVY (2001)

Gestão de Risco & Gargalos

O ambiente virtual serve como um laboratório de alta precisão para diagnosticar gargalos e testar estratégias de fluxo antes de sua implantação.

KLÜGL E BAZZAN (2012)| MACAL & NORTH (2010)

3. DIAGNÓSTICO





3. DIAGNÓSTICO



3.1 Empirismo na Programação Horária e Rigidez Operacional

Método Histórico e Isolado: Tabelas horárias baseadas em planilhas antigas e conhecimentos práticos da gestão anterior, sem cruzar a circulação física com as catracas.

Herança de Rigidez: Tempos de ciclo estáticos calibrados para uma época de frota homogênea.

Falhas em Obras e Via Singela: Impossibilidade de prever a taxa de ocupação real dos trens e plataformas, resultando em cenários imprevistos de superlotação nos picos.

Consequência Direta: Discussões da programação sem validação matemática em dados do tempo real durante intervenções.



3.2 Invisibilidade dos Fluxos e Desconhecimento do Carregamento

Lacuna de Rastreamento: Acesso conhecido apenas na entrada (bloqueios). Como a saída na rede é livre, o acompanhamento do passageiro era cortado após a catraca.

Incerteza de Sentido e Destino: Falta de dados para dividir a demanda entre os Sentidos A e B, dependendo de contagens visuais e relatórios defasados.

Apagão do Carregamento Crítico: Impossibilidade de fixar numericamente o ponto de estrangulamento da linha, impedindo o dimensionamento correto da oferta nos horários de pico.

Consequência Direta: Trens em operação baseados em médias gerais de bilhetagem, gerando pontos cegos de superlotação.



3. DIAGNÓSTICO



3.3 Gestão Reativa no CCO

Dependência do CFTV: Regulação baseada exclusivamente na extensão visível de câmeras, sem ferramentas preditivas ou projeção matemática do fluxo.

Atraso na Resposta: Trens reservas despachados apenas após a instalação da superlotação nas plataformas, gerando retenções em cadeia.

Ineficiência da Frota: Despacho emergencial sem cruzamento de dados, retendo viagens extras em circuitos de sinalização e via singela.

Consequência Direta: Atuação do CCO limitada à contenção de danos de um colapso já instalado nas estações.



3.4 Defasagem no Contingente de Segurança

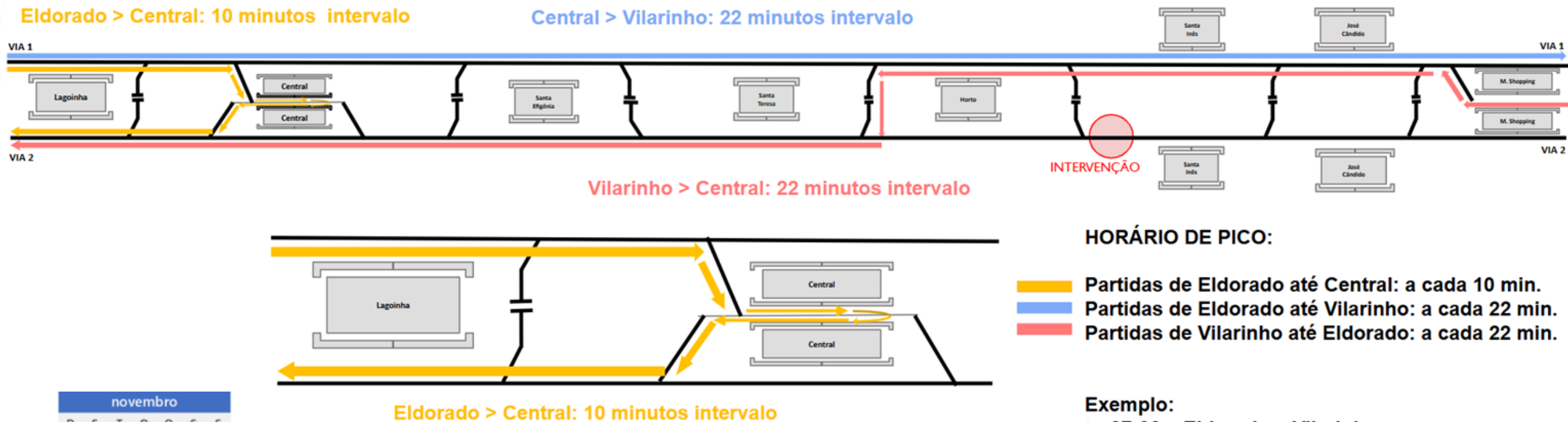
Escalas Históricas: Dimensionamento de equipes baseado em rotinas antigas, sem precisão sobre o adensamento real nas plataformas sob restrição.

Perda de Controle de Fluxo: Incapacidade de orientar o público e avisos operacionais deficientes durante a operação em via singela.

Efeito Cascata: Tumultos e lentidão no embarque/fechamento de portas, gerando riscos de segurança e retroalimentando o ciclo de atrasos do carrossel.

Consequência Direta: Riscos aumentados de quedas/pisoteamento e retroalimentação do ciclo de atrasos na linha.

3.5. CONSOLIDAÇÃO DO CENÁRIO CRÍTICO DE RESTRIÇÃO NA VIA SINGELA (NOVEMBRO DE 2025)



HORÁRIO DE PICO:

- Partidas de Eldorado até Central: a cada 10 min.**
- Partidas de Eldorado até Vilarinho: a cada 22 min.**
- Partidas de Vilarinho até Eldorado: a cada 22 min.**

Exemplo:

- ▶ 07:00 – Eldorado > Vilarinho
- ▶ 07:10 – Eldorado > Central
- ▶ 07:22 – Eldorado > Vilarinho
- ▶ 07:32 – Eldorado > Central

novembro						
D	S	T	Q	Q	S	S
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

4. METODOLOGIA



4. METODOLOGIA



Modelagem da Oferta (Trens & Via)

Dados reais dos trens: Coleta e tratamento dos tempos de ocupação dos CDVs.

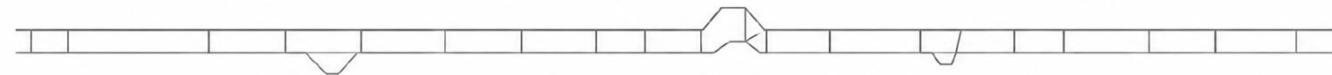
Geometria da via: Coleta dos tamanhos de todos os CDVs e AMVs via projeto.

Operação em condições reais:

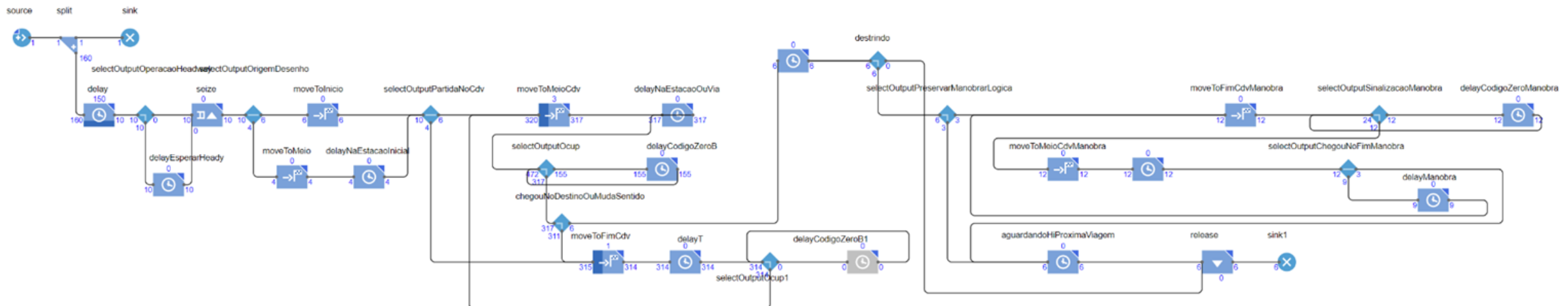
- Vias Singelas;
- Códigos 0;
- N Carrosséis.

Disparo de Viagens:

- Programa horário fixo;
- Programa horário dinâmico a partir de um headway.



Malha ferroviária Linha 1 do Metrô BH no Anylogic



Modelagem do problema no Anylogic utilizando a biblioteca Process Modeling Library.

4. METODOLOGIA



Modelagem da Demanda (Passageiros)

Construção da Matriz OD:

Inputs dos cartões de passagens
+ pagamentos no sistema.

Dados de bilhetagem em

tempo real: Pico manhã,
entrepico (vale) e pico tarde.

Cruzamento OD + Bilhetagem:

Direcionamento por sentido
nas estações em tempo real.

Integração passageiros e

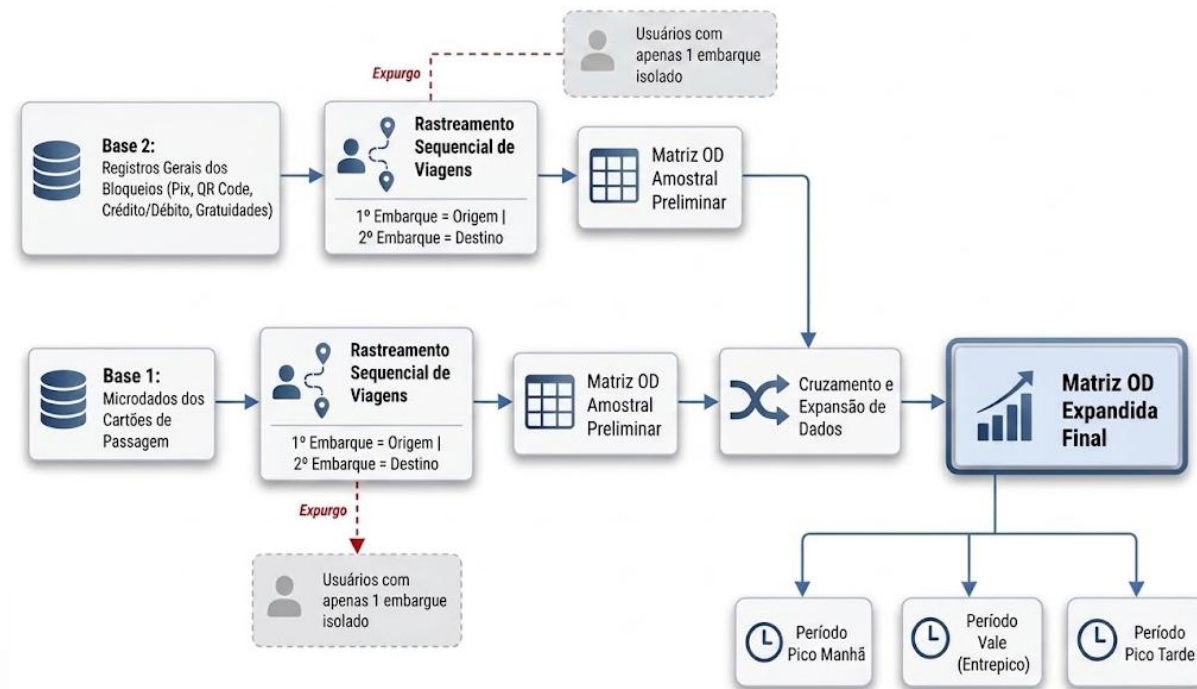
Trens: Carregamento em
tempo real por viagem.

array de desembarque

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 42 119 20 38 126 648



Array de desembarque dos passageiros de uma determinada viagem



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



Avaliação do Impacto Operacional: Função Objetivo Z

$$\text{Min } Z = P_2 \cdot O_{\text{Est}} + P_3 \cdot OT_{\text{trem}} + P_4 \cdot R_{\text{Sing}}$$

P2 - Peso Ocupação estações

P3 - Peso Ocupação nos trens

P4 - Peso Retenção via singla

OEst - Ocupação Máx estações

OTrem - Ocupação Máx nos trens

Rsing - Retenção Máx via singla

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS



■ 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Visualização da simulação da operação no software Anylogic



Sentido de circulação 1 (ELD - VRO)

Horário da simulação na operação

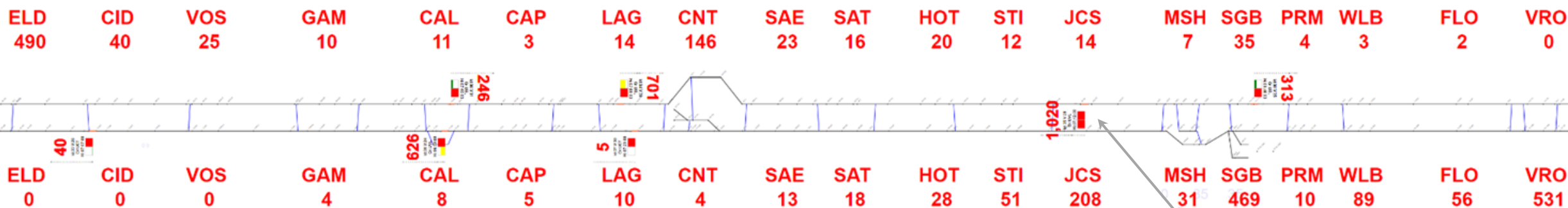
07:33:15

07:33:15

Plataforma da estação e sua respectiva quantidade de passageiros

07:33:15

07:33:15



Sentido de circulação 2 (VRO - ELD)

Trem e sua respectiva quantidade de passageiros

■ 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Comportamento operacional nas plataformas - Pico Manhã

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

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

- Eldorado (ELD) Sentido 1:
 - Dinâmico e oscilatório;
 - Não atinge níveis críticos de lotação.
- Vilarinho (VRO) Sentido 2:
 - Dinâmico e oscilatório;
 - Não atinge níveis críticos de lotação.
- São Gabriel (SGB) Sentido 2:
 - Crescente;
 - Plataforma paralela;
 - Integração com ônibus;
 - Patamar crítico 07:45;
 - Represamento crônico no carrossel.

■ 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Comportamento operacional nas plataformas - Pico Tarde

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

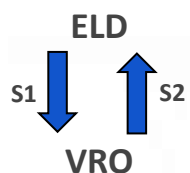
Sentido 2

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

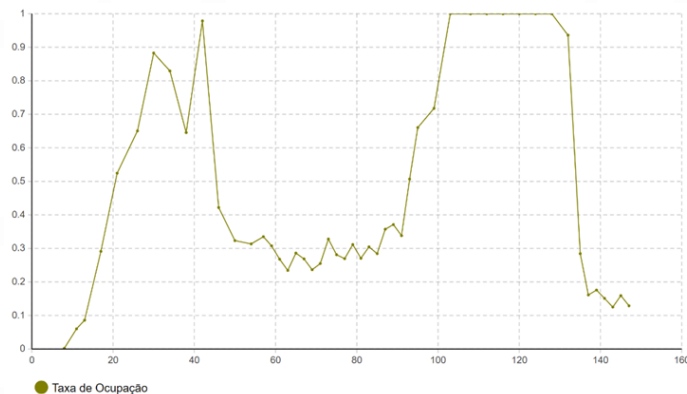
- Eldorado (ELD) Sentido 1:
 - Altamente equilibrado;
 - Não atinge níveis críticos de lotação.
- Santa Efigênia (SAE) Sentido 1:
 - Plataforma ilha;
 - Região hospitalar;
 - Patamar crítico 19:15;
 - Represamento crônico no carrossel.
- Sentido 2:
 - Altamente equilibrado.

■ 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

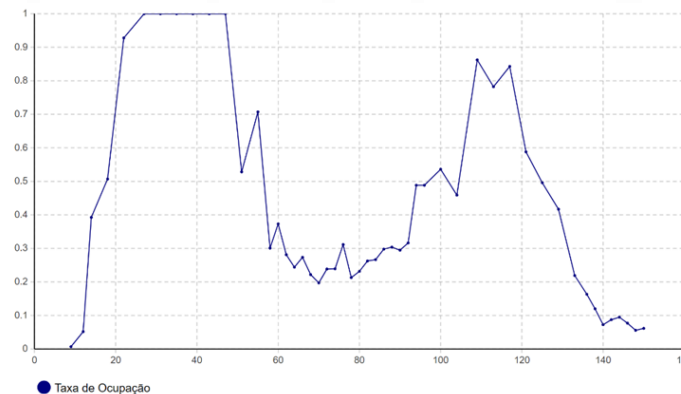
Taxa de Ocupação por Viagem do Programa Horário



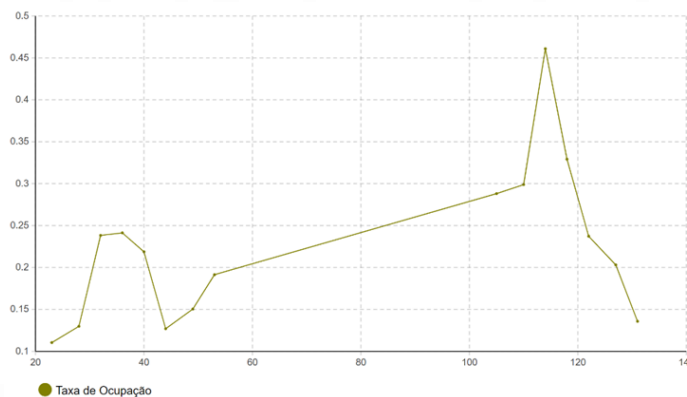
Sentido 1



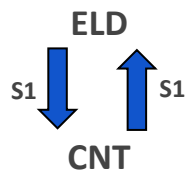
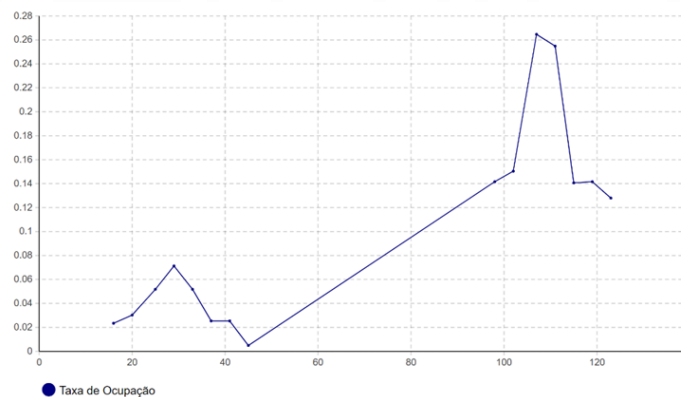
Sentido 2



Sentido 1



Sentido 2



- Sentido 1:
 - Pico Manhã:
 - Crescente;
 - Viagem 42 atinge 100% de lotação.
 - Pico Tarde:
 - Viagens com 100% de lotação
- Sentido 2:
 - Pico Manhã:
 - Viagens com 100% de lotação
 - Pico Tarde:
 - Altamente equilibrado.
- Sentido 1 e Sentido 2:
 - Altamente equilibrado.

6. CONCLUSÃO



6. CONCLUSÃO

1 Inovação Metodológica

- **Decisão por Dados:** Substituição de métodos empíricos pela simulação computacional no *software AnyLogic*.
- **Matriz OD Dinâmica:** Uso de microdados reais da bilhetagem eletrônica por faixas horárias.
- **Previsão de Fluxos:** Mapeamento matemático do acúmulo em plataformas e ocupação dos trens.

2 Diagnóstico Operacional

- **Carrossel Longo (ELD–VRO):** *Headway* de 22 min saturou a frota a 100% da capacidade no pico.
- **Carrossel Curto (ELD–CNT):** Intervalo de 10 min reduziu a ocupação a níveis seguros (25% manhã / 52% tarde).
- **Viagens Extras e Gargalos:** Inserção de viagens a partir das 07h15 e mapeamento das estações críticas (VRO, SGB, WLB / CNT, SAE, SAT).

3 Trabalhos Futuros

- **Sinalização Dinâmica:** Modulação de códigos de velocidade e integração com controle de acesso (catracas).
- **Modelagem Microscópica:** Inclusão de curvas reais de aceleração/frenagem e tempos individualizados por trem.
- **Frotas Mistas:** Simulação de carrossel alternando os tempos das composições + Disparo alternado de composições de forma estratégica.

- ✓ **Conclusão Principal:** O estudo comprovou ser possível executar modernizações ferroviárias agressivas com via singela sem comprometer a confiabilidade, a segurança e o nível de serviço dos passageiros.

32^a

SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

OBRIGADO(A)!

Lucas Duarte Santos

lucas.duarte@metrobh.com.br

Pablo Sousa Pinheiro

pablo.pinheiro@metrobh.com.br

Guilherme Fernando Teixeira Dantas

guilherme.dantas@metrobh.com.br

Jaqueline Becker da Silva

jaqueline.silva@metrobh.com.br



13ª Edição
Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP **TRILHOS**
Associação Nacional dos Transportadores
de Passageiros sobre Trilhos

TIC TRENS

 **AEAMESP**
ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE METRÔ