

21ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

CATEGORIA 3 Tecnologias de implantação, operação e manutenção de sistemas de transporte

Título: Simulação Computacional da Via Operacional da Linha 6 Laranja do metrô da cidade de São Paulo.

Autores:

Marcelo Moretti Fioroni é fundador e diretor de P&D na Paragon Decision Science, graduado em Engenharia Elétrica, Mestrado em Sistemas de Manufatura pela UNICAMP e Doutorado em Logística pela POLI-USP.

Gustavo Coelho Rodrigues é graduado em Engenharia Civil com Ênfase em Transportes pela UFJF e atua na área de Engenharia de Implantação da Concessionária Move São Paulo.

Luiz Augusto G. Franzese é fundador e CEO da Paragon Decision Science, graduado em Engenharia Industrial e Mestrado em Logística pela POLI-USP.

André Scorza é graduado em Arquitetura e Urbanismo e atua na área de Engenharia de Implantação da Concessionária Move São Paulo.

Gabriel D'avelly Garcia é graduando em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Mackenzie e atua na área de Engenharia de Implantação da Concessionária Move São Paulo.

Isac Reis de Santana é Consultor de Simulação da Paragon Decision Science, tem grau técnico e experiência em mais de 40 projetos de simulação.

21ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

CATEGORIA 3 Tecnologias de implantação, operação e manutenção de sistemas de transporte

Título: Simulação Computacional da Via Operacional da Linha 6 Laranja do metrô da cidade de São Paulo.

Introdução

O transporte metroviário é uma das principais opções de transporte público na maioria das cidades onde está presente. No caso de São Paulo, sua participação é ainda mais crítica, principalmente por ser uma opção vista como claramente superior em qualidade às alternativas, em especial no que se refere ao tempo de deslocamento.

O metrô de São Paulo é a “espinha dorsal” do sistema de transporte público da cidade economicamente mais importante do país. A garantia de sua eficiência e a possibilidade de expansão do sistema metroviário exerce considerável influência sobre a qualidade de vida da população e sobre a economia da cidade.

Todavia, a implantação de uma nova linha em uma cidade densamente ocupada como São Paulo deve ser muito bem planejada, pois se os benefícios são altos, as consequências de um erro de projeto também são enormes, sejam em termos monetários ou para o dia a dia da população. É neste aspecto que a técnica de Simulação pode contribuir decisivamente, pois se trata da forma mais precisa e segura de se avaliar um sistema. Estudos de simulação são bastante aplicados em estudos ferroviários, como o realizado por Dessouky et. al (2002) com uma avaliação estratégica de linha ferroviária urbana e o de Leilich (1998). No Brasil, a maioria das aplicações de simulação são feitas para ferrovias de longa distância, principalmente as voltadas para transporte de minério, como o estudo de Fioroni & Botter

(2008). Estudos de pátio também são feitos por simulação, como o realizado por Fioroni et. al. (2004) sobre o pátio de Tubarão no Espírito Santo, operado pela Vale. Através da Simulação pode-se colocar o sistema em funcionamento considerando todos os aspectos relevantes, tanto físicos como operacionais, e detectar possíveis problemas. Também podem ser estudados diversos cenários alternativos, para avaliar os horários de pico, possíveis falhas nos trens, interrupções na via permanente, diferentes estratégias de operação, dentre outras.

É nesse contexto que se situa o projeto da Linha 6 Laranja. A Concessionária Move São Paulo - formada por Odebrecht TransPort, Queiroz Galvão, UTC Participações e Fundo Eco Realty é responsável pela PPP (Parceria Público Privada) da Linha 6 - Laranja do metrô de São Paulo. Trata-se de uma linha que interligará a atual estação São Joaquim da Linha 1 - Azul do metrô com a futura Estação Brasilândia, com o traçado planejado conforme se pode ver na Figura 1. As estações atendidas pela linha, bem como suas integrações, estão apresentadas na Figura 2.

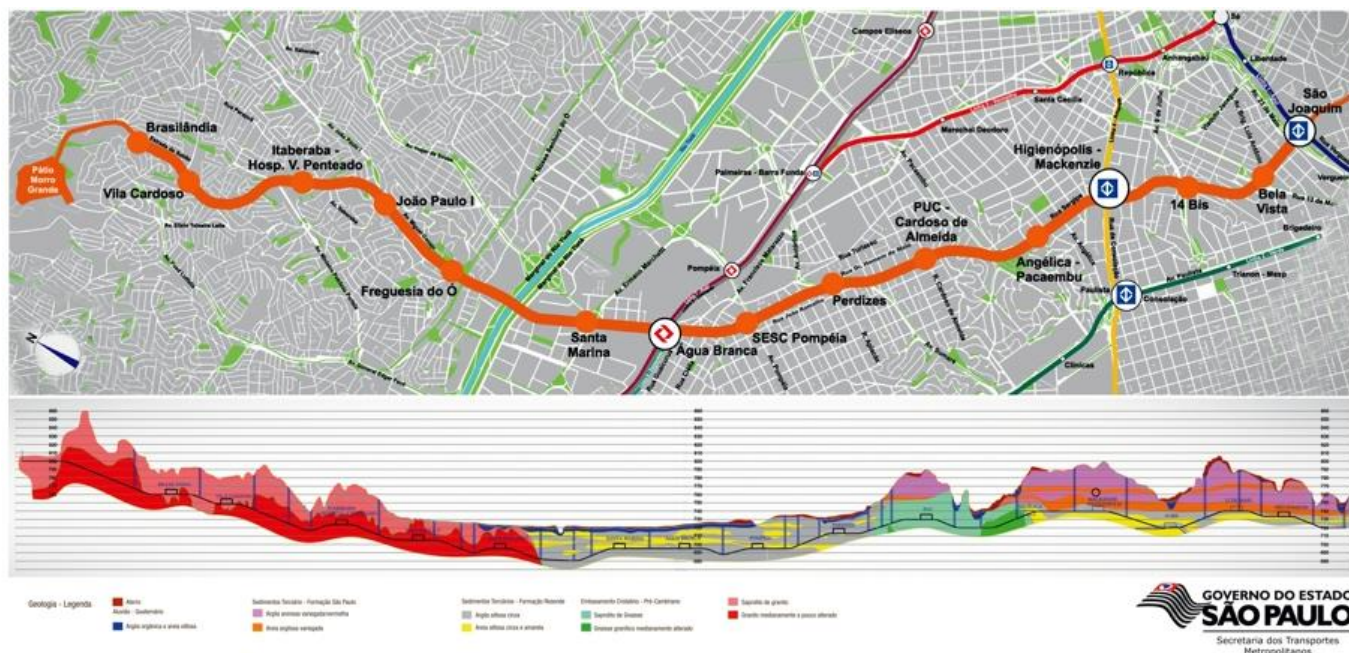


Figura 1 – Traçado planejado para a Linha 6 Laranja



Figura 2 – Estações atendidas pela Linha 6 Laranja

Diagnóstico

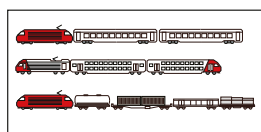
Durante a fase de projeto da Linha 6 Laranja a Move São Paulo tinha vários desafios: avaliar o traçado projetado, definir o fornecedor dos trens e analisar diversas alternativas operacionais frente a interrupções na via ou falhas nas composições. Todos os desafios foram avaliados conforme as exigências do contrato de concessão, que regula o serviço de transporte a ser prestado pela Concessionária e seu nível de qualidade.

Buscando garantir a qualidade do serviço de transporte a ser prestado, o aprimoramento de projetos e a análise de alternativas operacionais, a Move São Paulo realizou uma simulação computacional do funcionamento da linha.

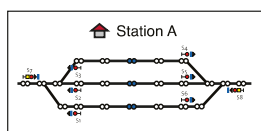
Para isso, foi identificada a ferramenta Opentrack, associada a expertise de simulação da Paragon Decision Science, que também é a distribuidora da ferramenta no Brasil.

O Opentrack é uma ferramenta de simulação operacional, cuja principal característica é considerar o sistema em alto nível de detalhe para estudos de curto prazo. O diagrama geral do seu funcionamento está apresentado na Figura 3.

Dados de entrada



Material circulante

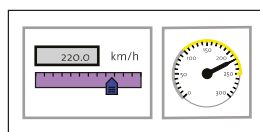


Infra-estrutura

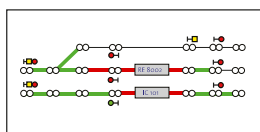
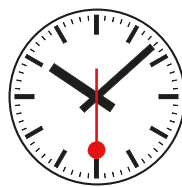
Comboio ID	Station	Arrival	Departure	Wait
IC 5000	BSG	HHMMSS	08:20:00	0
IC 5000	VPS	08:24:00	08:25:00	60
IC 5000	OBE	HHMMSS	08:31:00	30
IC 5000	JAT	HHMMSS	08:38:00	60
IC 5000	GRS	HHMMSS	HHMMSS	0
IC 5000	PEW	HHMMSS	HHMMSS	0
IC 5000	WED	08:55:00	HHMMSS	60

Horários

Simulação

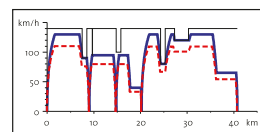


Inter-actividade

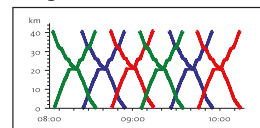


Animação

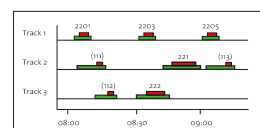
Dados de saída



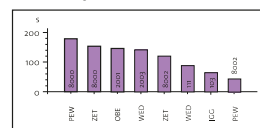
Diagramas



Gráficos de comboios



Occupação das vias



Dados estatísticos

Figura 3 – Diagrama esquemático do Opentrack

Basicamente, o usuário descreve todas as características físicas da linha e do material rodante. Define a grade operacional e escolhe um período para a simulação. Ao simular, é possível visualizar uma animação semelhante a um painel supervisorio de centro de controle. Os gráficos de cruzamento vão sendo montados simultaneamente ao processamento da simulação. Ao final, podem ser montados gráficos e relatórios a respeito de todos os aspectos relevantes da simulação, como tempos de ciclo, consumo de energia, velocidade comercial, etc.

A construção do modelo envolveu uma equipe multidisciplinar que considerou todas as características físicas da via permanente, tais como, raio das curvas, mudanças de nível, tipo de túneis, limitações de velocidade e sistemas de sinalização. O estudo foi dividido em duas fases:

Fase I - Determinação do trem e características principais da operação. Esta fase teve os seguintes objetivos:

- Avaliar o traçado proposto;
- Determinar qual o melhor trem, dentre os cinco fornecedores selecionados;

- Determinar a frota ideal do melhor trem;
- Identificar qual o limite de velocidade ideal: 80 ou 90Km/h.
- Determinar o tempo de ciclo real;

Fase II: Estudo de cenários de operação e uso dos pátios. Esta fase teve os seguintes objetivos:

- Determinar o tempo de estacionamento e retirada dos trens do Pátio de Estacionamento e Manutenção da Linha, o Pátio Morro Grande, localizado no bairro de Brasilândia;
- Avaliar o desempenho da linha em 28 cenários de operação degradada, considerando indisponibilidades diversas de trechos da linha;

Uma vez construído o modelo computacional, o trem de cada um dos fornecedores foi avaliado individualmente e com a frota completa em circulação, operando em horários de pico. O modelo considerou diversas características do trem para a simulação, sendo elas: a capacidade de cada veículo em número de passageiros, o peso da composição, os limites de conforto e operação (frenagem, aceleração, “jerk”, dentre outras) e a curva de potência dos motores do trem.

A interface gráfica de animação do modelo está apresentada na Figura 5.

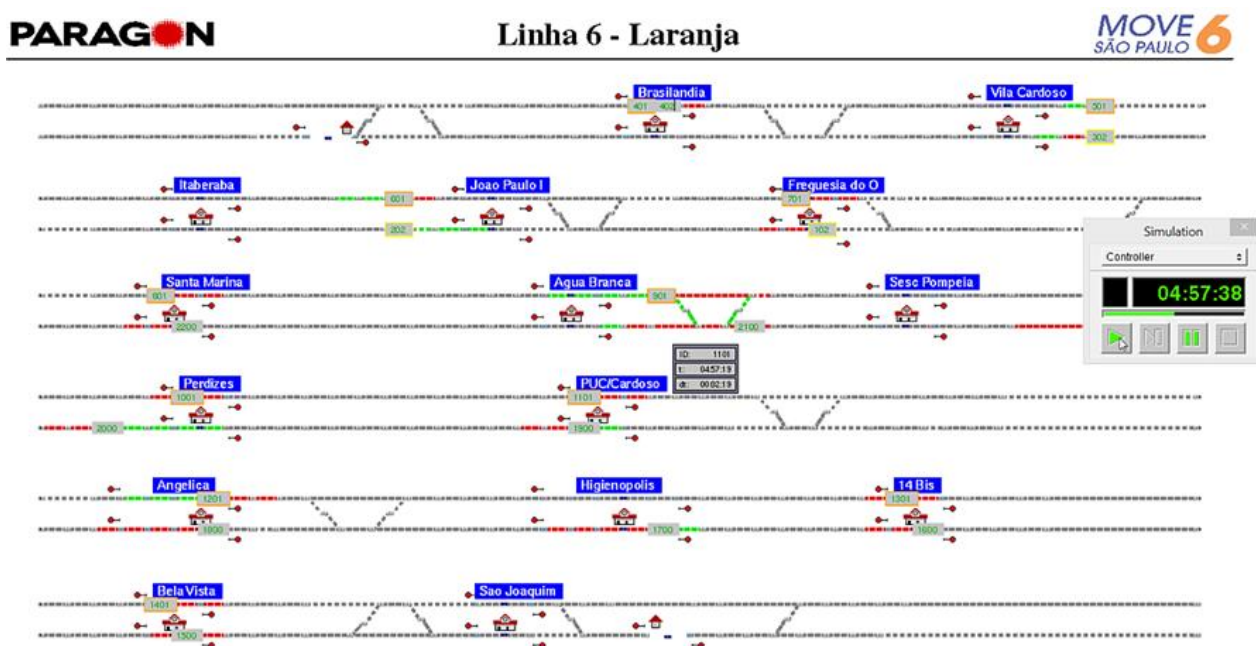


Figura 5 – Animação do modelo

Os diferentes limites de velocidade foram estudados para todos os trens com o objetivo de melhorar tempos de ciclo e economizar energia. Foram coletados indicadores de tempo de ciclo, consumo de energia e headway. A simulação permitiu a realização de comparações entre todas as alternativas, facilitando o trabalho de escolha da melhor opção.

Uma vez definidos o trem e a velocidade máxima a ser adotada foi encerrada a Fase I, seguindo-se à Fase II, onde foram simulados diversos cenários de anormalidade na operação, tais como interrupções na via permanente e indisponibilidade de estações. Cada cenário simulado permitiu a previsão e a análise de cenários alternativos de operação, que poderão ser implantados futuramente em resposta as falhas. Mais de 25 cenários de anormalidade foram simulados para avaliar o comportamento do sistema.

Na sequência das simulações, foi estudada a movimentação das composições no Pátio de Estacionamento e Manutenção da Linha, localizado em Morro Grande. A simulação permitiu medir o tempo mínimo de manobra de entrada e saída de trens no estacionamento. Os resultados de cada fase são apresentados a seguir.

Análise dos Resultados da Fase I

Os resultados obtidos nos diversos experimentos foram reunidos na tabela da Figura 6, para 80Km/h e Figura 7 para 90Km/h. Foi constatado que para o atendimento do carregamento máximo de 35.233 passageiros na hora pico da manhã (diretriz do Contrato de Concessão) seria necessária uma frota mínima de 20 trens operacionais.

#	Cenário	Número de trens	Velocidade Máxima (Km/h)	Tempo de ciclo (min.)	Headway (seg)	Headway ótimo (seg)	Energia consumida ciclo (MJ)	Energia consumida hora pico (MWh)	Energia total consumida hora pico (MWh)	Passageiros Transportados/hora	Percentual Atendimento
1	Avaliação trem 1	20	80	0:51:12	153.6	144.2	4,321	1.41	28	36,820	104.5%
2		21	80	0:51:12	146.3	144.2	4,321	1.41	30	38,661	109.7%
3		22	80	0:51:12	139.6	144.2	4,321	1.41	31	40,502	115.0%
4		23	80	0:51:12	133.6	144.2	4,321	1.41	32	42,343	120.2%
5	Avaliação trem 2	20	80	0:50:52	152.6	143.8	4,435	1.45	29	36,944	104.9%
6		21	80	0:50:52	145.3	143.8	4,435	1.45	31	38,791	110.1%
7		22	80	0:50:52	138.7	143.8	4,435	1.45	32	40,638	115.3%
8		23	80	0:50:52	132.7	143.8	4,435	1.45	33	42,485	120.6%
9	Avaliação trem 3	20	80	0:52:25	157.3	143.2	4,161	1.32	26	35,714	101.4%
10		21	80	0:52:25	149.8	143.2	4,161	1.32	28	37,500	106.4%
11		22	80	0:52:25	143.0	143.2	4,161	1.32	29	39,285	111.5%
12		23	80	0:52:25	136.7	143.2	4,161	1.32	30	41,071	116.6%
13	Avaliação trem 4	20	80	0:53:26	160.3	146.1	4,109	1.28	26	35,731	101.4%
14		21	80	0:53:26	152.7	146.1	4,109	1.28	27	37,517	106.5%
15		22	80	0:53:26	145.7	146.1	4,109	1.28	28	39,304	111.6%
16		23	80	0:53:26	139.4	146.1	4,109	1.28	29	41,090	116.6%
17	Avaliação trem 5	20	80	0:52:04	156.2	145.1	4,211	1.35	27	36,415	103.4%
18		21	80	0:52:04	148.8	145.1	4,211	1.35	28	38,236	108.5%
19		22	80	0:52:04	142.0	145.1	4,211	1.35	30	40,056	113.7%
20		23	80	0:52:04	135.8	145.1	4,211	1.35	31	41,877	118.9%

Figura 6 – Resultados para 80Km/h

#	Cenário	Número de trens	Velocidade Máxima (Km/h)	Tempo de ciclo (min.)	Headway (seg)	Headway ótimo (seg)	Energia consumida ciclo (MJ)	Energia consumida hora pico (MWh)	Energia total consumida hora pico (MWh)	Passageiros Transportados/hora	Percentual Atendimento
21	Avaliação trem 1	20	90								
22		21	90								
23		22	90								
24		23	90								
25	Avaliação trem 2	20	90	0:50:28	151.4	143.8	4,721	1.56	31	37,236	105.7%
26		21	90	0:50:28	144.2	143.8	4,721	1.56	33	39,098	111.0%
27		22	90	0:50:28	137.6	143.8	4,721	1.56	34	40,960	116.3%
28		23	90	0:50:28	131.7	143.8	4,721	1.56	36	42,822	121.5%
29	Avaliação trem 3	20	90	0:52:07	156.4	143.2	4,358	1.39	28	35,919	101.9%
30		21	90	0:52:07	148.9	143.2	4,358	1.39	29	37,715	107.0%
31		22	90	0:52:07	142.1	143.2	4,358	1.39	31	39,511	112.1%
32		23	90	0:52:07	136.0	143.2	4,358	1.39	32	41,307	117.2%
33	Avaliação trem 4	20	90	0:53:10	159.5	146.1	4,297	1.35	27	35,910	101.9%
34		21	90	0:53:10	151.9	146.1	4,297	1.35	28	37,705	107.0%
35		22	90	0:53:10	145.0	146.1	4,297	1.35	30	39,501	112.1%
36		23	90	0:53:10	138.7	146.1	4,297	1.35	31	41,296	117.2%
37	Avaliação trem 5	20	90								
38		21	90								
39		22	90								
40		23	90								

Figura 7 – Resultados para 90Km/h

Os fornecedores dos trens 1 e 5 não forneceram as curvas de esforço trator para uma velocidade máxima de 90 km/h.

Os gráficos apresentados na Figura 8 foram utilizados para comparar as duas situações, onde a linha negra representa o limite de velocidade para o trecho e as linhas coloridas representam os trens. É possível visualizar a redução de velocidade na aproximação das estações, onde o limite é de 60Km/h.

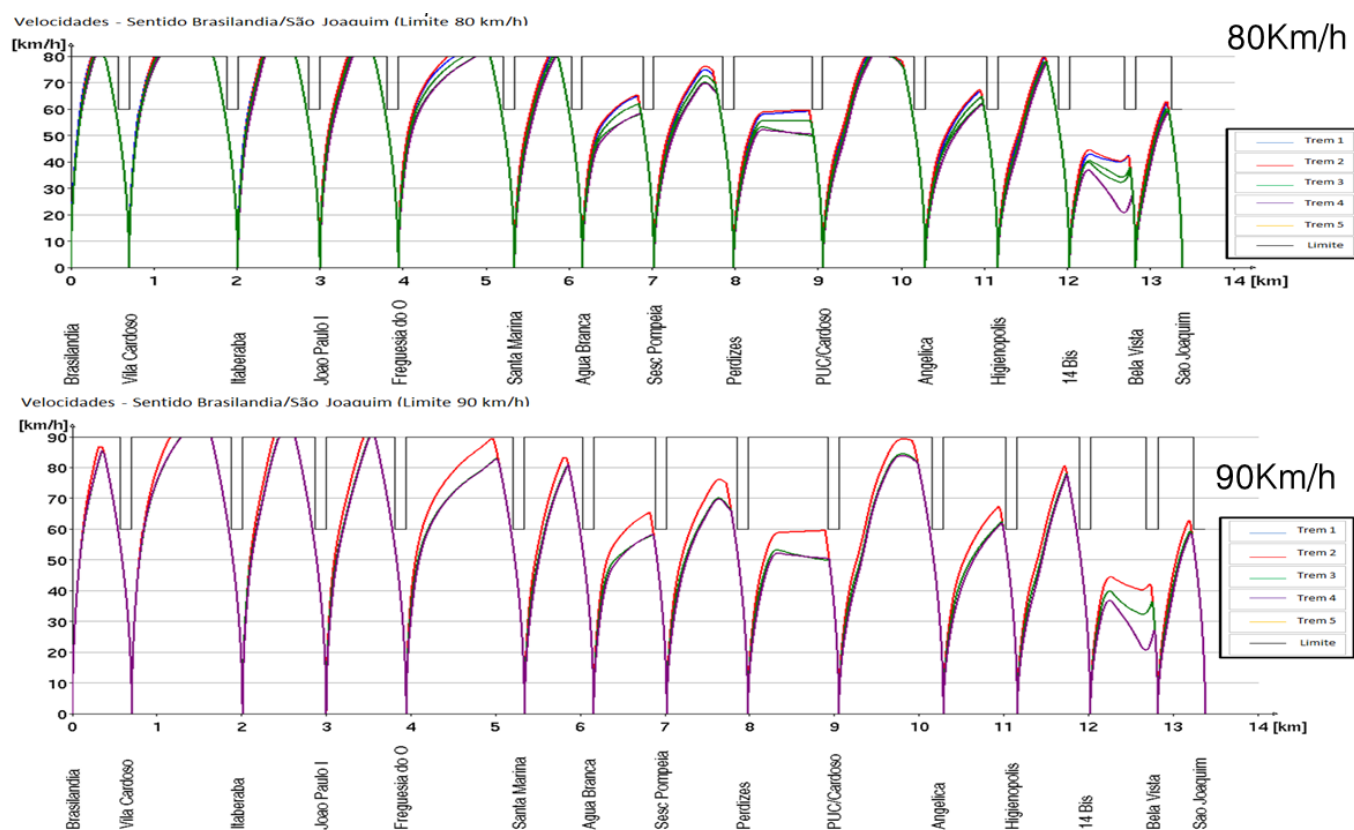


Figura 8 – Gráficos de Velocidade por Quilômetro da linha

A análise dos resultados excluiu a possibilidade de operação com velocidade máxima de 90 Km/h, visto que, os benefícios apresentados eram acanhados quando comparados aos custos associados.

Identificou-se que a frota ideal seria de 20 trens operando com o limite de velocidade de 80Km/h. Esta frota garante a capacidade de transporte necessária para a linha, aliada ao menor consumo de energia.

A análise técnica dos resultados atestou que todos os fornecedores estavam aptos a operar conforme o cenário operacional estabelecido.

Este fato possibilitou à equipe da Move São Paulo maior flexibilidade de negociação com os fornecedores, pois permitiu a definição do trem em função da análise da melhor relação benefício técnico-comercial.

Análise dos Resultados da Fase II

A fase II teve por objetivo avaliar os tempos de entrada e saída do Pátio Morro Grande e a análise de cenários diversos de operação degradada. As simulações demonstraram que o tempo de estacionamento e retirada de todos os trens do Pátio Morro Grande é parecido: cerca de 11 minutos. Este tempo foi considerado adequado pela equipe de projetistas.

Constituem os cenários de operação degradada todas as situações de anormalidade operacional em que determinados trechos da linha são interrompidos. Normalmente são ocasionados por falhas na via permanente, sistemas operacionais ou trens. A Figura 9 ilustra uma destas situações.

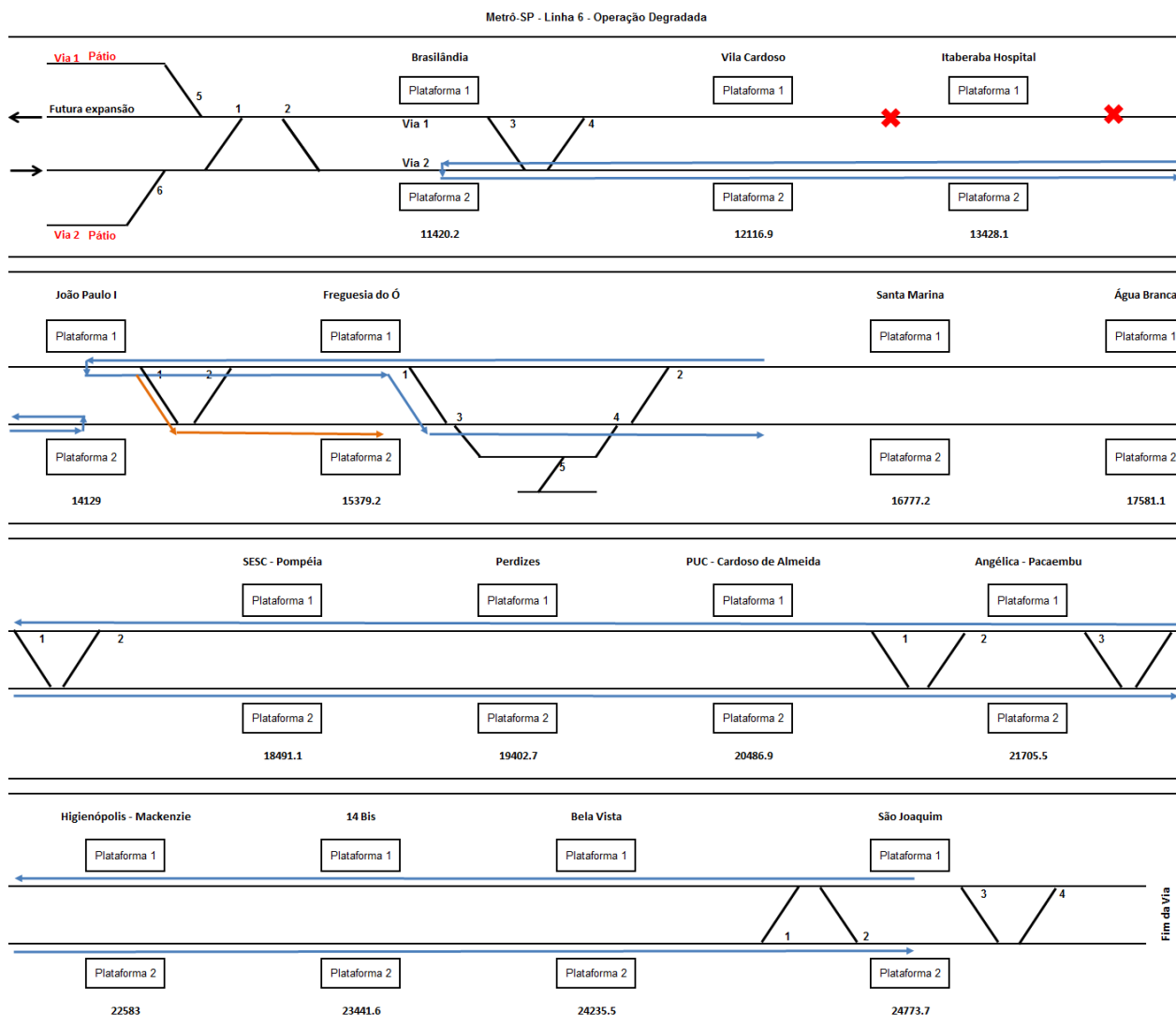


Figura 9 – Cenário com operação degradada

Os cenários estudados com operação degradada foram os seguintes:

- Paralisação no trecho Brasilândia - João Paulo I nas vias 1 ou 2.
- Paralisação no trecho Brasilândia - João Paulo I na via 1.
- Paralisação no trecho Brasilândia - João Paulo I na via 2.
- Paralisação no trecho Freguesia do Ó - Santa Marina na via 1, entre os Travessões 1 e 2.
- Paralisação no trecho Freguesia do Ó - Santa Marina na via 1, entre os Travessões 1 e 2.
- Paralisação no trecho entre Freguesia do Ó Santa Marina na via 1 após o travessão 3.
- Paralisação no trecho entre Freguesia do Ó Santa Marina entre os Travessões 3 e 4 na Via 2.

- Paralisação no trecho entre Freguesia do Ó Santa Marina após o Travessões 4 na via 2.
- Paralisação no trecho entre Santa Marina e Água Branca na via 1;
- Paralisação no trecho entre Santa Marina e Água Branca na Via 2;
- Paralisação no trecho entre Água Branca e PUC nas Vias 1 e 2;
- Paralisação no trecho entre Água Branca e SESC Pompéia após o Travessão 2 na Via 1;
- Paralisação no trecho entre Água Branca e SESC Pompéia após o Travessão 2 na Via 2;
- Paralisação no trecho entre SESC Pompéia e Perdizes na Via 1;
- Paralisação no trecho entre Perdizes e PUC Cardoso na Via 2;
- Paralisação no trecho entre SESC Pompéia e Perdizes na Via 2;
- Paralisação no trecho entre Perdizes e PUC-Cardoso de Almeida na Via 1;
- Paralisação na Plataforma Angélica-Pacaembu - Via 1;
- Paralisação na Plataforma Angélica-Pacaembu - Via 2;
- Paralisação no trecho entre Angélica-Pacaembu e Higienópolis-Mackenzie na Via 1;
- Paralisação no trecho entre Angélica-Pacaembu e Higienópolis-Mackenzie na Via 2;
- Paralisação no trecho entre Higienópolis-Mackenzie e 14 Bis na Via 1;
- Paralisação no trecho entre Higienópolis-Mackenzie e 14 Bis na Via 2;
- Paralisação no trecho entre 14 Bis e Bela Vista na Via 1;
- Paralisação no trecho entre 14 Bis e Bela Vista na Via 2;
- Paralisação no trecho entre Bela Vista e São Joaquim na Via 1;
- Paralisação no trecho entre Bela Vista e São Joaquim na Via 2;

Para cada cenário foi elaborada uma estratégia de operação, que foi experimentada na simulação. Dependendo dos resultados, a estratégia era modificada e novamente simulada. Com esse processo, chegou-se à melhor condição de operação para cada cenário degradado.

Conclusões

A simulação computacional realizada amparou as decisões de investimento da Concessionária Move São Paulo para a aquisição de sua frota de trens. A definição do cenário operacional ótimo evidenciou a aptidão de todos os fornecedores, possibilitando à equipe da Move São Paulo maior flexibilidade de negociação, pois permitiu a definição do trem em função da análise da melhor relação benefício técnico-comercial.

O conhecimento prévio das situações de anormalidade na linha é de extrema importância para o operador, pois possibilita a redução de seu tempo de reação, elevando a disponibilidade da linha e garantindo sua segurança operacional. Essa agilidade na tomada de decisões se reflete na percepção dos usuários dos atrasos na linha.

Os resultados das simulações dos cenários de operação normal e degradada possibilitaram ainda a revisão dos projetos civis da via permanente. Diversas restrições operacionais foram percebidas e retificadas ainda na fase de projeto básico. Esta revisão proporcionou uma redução do tempo de ciclo operacional, acarretando em um aumento da oferta de transporte sem a necessidade do acréscimo de novos trens.

A ferramenta Opentrack foi integrada à rotina da Move São Paulo, de forma que os estudos podem ser atualizados, alterados e refinados.

Durante a operação comercial da linha o modelo de simulação computacional poderá ser utilizado em avaliações diversas, tais como: alterações operacionais, operações especiais (feriados, eventos, etc.), interferências, alteração da previsão de demanda, futuras expansões, dentre outros.

Declaração e Reconhecimento

Declaramos que o presente trabalho é inédito, não tendo sido publicado em livro, revistas especializadas ou na imprensa em geral. Os autores agradecem a Move São Paulo por permitir a divulgação deste trabalho e de seus resultados.

Referências Bibliográficas

DESSOUKY, M. M., Q. Lu, e R. C. Leachman. 2002. **Using Simulation Modeling to Assess Rail Track Infrastructure in Densely trafficked Metropolitan Areas**. Em Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, editado por E. Yücesan, C.-H. Chen, J. L. Snowdon, e J. M. Charnes, 725–731.

FIORONI, M. M., R. C. Botter, F. M. Pompermayer, e L. A. G. Franzese. 2004. **Estudo Estratégico de Dimensionamento da Infra-Estrutura do Pátio Ferroviário de Tubarão Através de Simulação**. Em Anais do XVII ANPET, 969–976. Florianópolis-SC, Brasil.

LEILICH, R. H. 1998. **Application of Simulation Models in Capacity Constrained Rail Corridors**. Em Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, Editado por D. J. Medeiros, E. F. Watson, J. S. Carson e M. S. Manivannan, 1125–1133. Piscataway, New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

FIORONI, Marcelo Moretti. **Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil: avaliação de alternativas para o direcionamento de composições**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-03062008-180002/>>. Acesso em: 2015-07-29