CATEGORIA 3

ESTUDOS E SIMULAÇÕES – SISTEMAS DE TRAÇÃO ELÉTRICA E MÉDIA TENSÃO DO METRÔ/SP.

AUTORES

- Adalberto de Paula Ramos; Metrô/SP; Engenheiro Eletricista;

Chefe do Departamento de Projetos de Sistemas Eletromecânicos, na Gerência de Projetos do Metrô-SP;

Trabalhou nas Gerências de Manutenção e Implantação de Sistemas do Metrô, cursou Pós Graduação em Tecnologia Metroferroviária na Poli-USP.

- André Luiz Pisani de Almeida; Metrô/SP; Engenheiro Eletricista;

Engenheiro Especializado da Coordenadoria de Projetos de Sistemas Elétricos e Material Rodante, na Gerência de Projetos do Metrô-SP;

Trabalhou nas Gerências de Montagem, Manutenção e Logística do Metrô, cursou Pós Graduação em Tecnologia Metroferroviária na Poli-USP.

- Eduardo Marcello Casado; Metrô/SP; Engenheiro Eletricista;

Coordenador de Projetos de Sistemas Eletromecânicos, na Gerência de Projetos do Metrô-SP;

Trabalhou nas Gerências de Manutenção e Operação do Metrô, cursou Pós Graduação em Tecnologia Metroferroviária na Poli-USP.

- Rodrigo Coura Oliveira; Metrô/SP; Engenheiro Eletricista;

Coordenador de Projetos de Sistemas Elétricos e Material Rodante, na Gerência de Projetos do Metrô-SP;

Trabalhou na Gerência de Implantação de Sistemas do Metrô, cursou Pós Graduação em Tecnologia Metroferroviária na Poli-USP, possui certificado PMP (Project Management Professional) emitido pelo PMI (Project Management Institute).

- Ruan Streitenberger Guedes; Metrô/SP; Engenheiro Eletricista;

Engenheiro da Coordenadoria de Estudos e Planejamento da Manutenção de Eq. Fixos Elétricos e Eletromecânicos, na Gerência de Manutenção do Metrô-SP;

Trabalhou na Gerência de Projetos do Metrô, cursou Pós Graduação em Eficiência Energética no Senai/SP.

INTRODUÇÃO

Este artigo apresenta alguns estudos elaborados durante a fase de desenvolvimento do projeto executivo dos sistemas de Média Tensão e Tração Elétrica das Linhas 4 (segunda fase) e 5 do Metrô de São Paulo.

Durante a implantação das Linhas citadas, foram solicitadas pela GIS (Gerência de Implantação de Sistemas) à GPR (Gerência de Projetos), avaliações relacionadas aos Sistemas de Média Tensão e Tração, sob diferentes condições operacionais, considerando particularidades relacionadas às implantações de tais Linhas.

Foram utilizados os softwares Elbas e Etap na avaliação, sendo eles ferramentas computacionais utilizadas para elaboração de simulação elétrica (Sistema CC – Tração Elétrica) e estudo de fluxo de potência (Sistema CA - 22kV), respectivamente.

Em relação à simulação elétrica, é possível determinar, considerando as diversas variáveis de entrada envolvidas (headway, características do material rodante, características geométricas da via permanente etc.), se as subestações retificadoras suportam as solicitações resultantes dos esforços trativos dos trens (entre outros dados), obtendo como resultados diversas informações que permitem emissão de parecer técnico.

Já o estudo do fluxo de potência permite checar se os alimentadores relacionados aos circuitos de Média Tensão não estarão submetidos a sobrecargas, considerando as diversas configurações possíveis, incluindo operação degradada, garantindo desta forma a operação segura do Sistema. Ressalta-se que o fluxo de potência fornece subsídios para desenvolvimento do estudo de seletividade e coordenação das proteções, desenvolvido posteriormente.

DIAGNÓSTICO

Linha 4-Amarela.

A implantação da Linha 4 está sendo executada em duas fases; o Consórcio Via Amarela II (CVA II) é responsável pela implantação do Sistema de Alimentação Elétrica (SAL) na segunda fase. Na primeira, ocorreu a implantação de toda a Linha, excetuando-se cinco estações: Fradique Coutinho (FRA), Higienópolis-Mackenzie (HIG), Oscar Freire (FRE),

São Paulo-Morumbi (MBI) e Vila Sonia(VSO). Ressalta-se que as subestações de FRA foram implantadas e tornaram-se operacionais na primeira fase.

Foram avaliados, pelo Metrô, os reforços previstos para serem executados na segunda fase, considerando as novas condições operacionais impostas pelo trens e pelo Sistema de Sinalização adquiridos pela concessionária ViaQuatro. Os resultados foram comparados com aqueles fornecidos pelo CVAII e pela concessionária, que contratou empresa internacional para avaliação do assunto.

A avaliação considerou a operação com *headway* de 90 segundos e a existência de 7 subestações retificadoras, com potência nominal de 8MW cada, para o trecho operacional, entre as estações LUZ e VSO.

Cada retificadora é formada por 4 alimentadores positivos (relacionados aos disjuntores extrarrápidos, cujos tags de identificação são F11, F21, F31 e F41), sendo cada um deles conectado a um tramo elétrico (trecho da rede aérea) específico, excetuando-se a retificadora localizada no Pátio Vila Sônia (PVS), que possui apenas 2 alimentadores positivos (tags F31 e F41). Ressalta-se que todo tramo é alimentado por dois disjuntores, normalmente localizados em retificadoras distintas.

Linha 5-Lilás.

Tendo em vista as particularidades de implantação da Linha 5, que se caracterizou por acréscimo gradativo dos trechos operacionais e de suas subestações retificadoras e auxiliares, diferentes estudos foram realizados para determinação de possíveis restrições operacionais (circulação de trens) conforme evolução do empreendimento.

Operação da Linha 5 anteriormente à Implantação da Estação Campo Belo (CPB).

A subestação Campo Belo é uma das principais para o SAL da Linha 5, pois recebe um dos alimentadores troncos da subestação primária Bandeirantes (YBN). Ocorre que a subestação CPB foi implantada apenas em 2019, pois a estação CPB foi a última disponibilizada para operação. Assim sendo, a Linha 5 operou sem um importante elemento do SAL durante vários meses.

Foi avaliada a necessidade de restrição operacional considerando a operação da Linha no trecho compreendido entre o pátio Capão Redondo (PCR) e a estação Chácara Klabin (CKB).

Destaca-se que também foi considerada a necessidade de alimentação de toda Linha apenas através da subestação primária Bandeirantes (YBN), ou seja, com a subestação primária Guido Caloi (YBN) inoperante. Este cenário corresponde a uma dupla degradação no Sistema. A alimentação elétrica de toda a Linha através de uma única subestação primária é obtida através de manobras em disjuntores pertinentes, caracterizando uma funcionalidade existente no Sistema de Média Tensão denominada Transferência Automática de Setores (TAS).

Teste de Homologação da Via Permanente

Os testes para homologação da via permanente entre o VSE Bandeirantes e CKB foram executados anteriormente ao comissionamento das respectivas subestações Hospital São Paulo (HSP), Santa Cruz (SCZ) e CKB.

Para tal, foi necessária avaliação em relação a possibilidade de execução dos testes com limitação na quantidade de subestações retificadoras no trecho citado, sendo que esta condição não deveria restringir os testes estabelecidos para homologação da via.

O trecho de via em questão é compreendido entre os VSEs Bandeirantes e Dionísio da Costa (PK-marco quilométrico 15,4 e 21,3), sendo que a simulação avaliou a viabilidade dos testes apenas com as subestações retificadoras Eucaliptos (ECT) e AACD-Servidor (SER) em funcionamento.

As seguintes diretrizes foram estabelecidas no estudo:

a-) Seccionamento das vias na região do VSE Bandeirantes, ou seja, a região em teste permaneceu isolada eletricamente do trecho operacional;

b -) Realização do teste na Via 2;

c -) Utilização de um trem da Frota F;

d-) Carregamento AW4, com desempenho máximo (taxa de aceleração e velocidade máxima);

e-) Inexistência de paradas nas estações intermediárias;

f-) Gaps (isolating points) nas entradas das plataformas ‘jumpeados”;

g-) Catenárias das vias 1 e 2 conectadas;

h-) Existência de crossbonds apenas nas subestações retificadoras ECT e SER.

Em complemento, e considerando a possibilidade da realização de testes após a inauguração da estação ECT, foi realizada uma segunda simulação, no trecho

compreendido entre os marcos 17,0 e 21,3 km (MOE – VSE Dionísio da Costa), permitindo desta forma que os testes fossem executados simultaneamente à operação comercial no trecho entre as estações Capão Redondo (CPR) e ECT.

Para este caso, foi considerado o seccionamento da via no km 17,0, e apenas a subestação retificadora SER alimentando o trecho em teste, sendo adotadas as premissas b-) a g-) acima, bem como a existência de crossbonds apenas em SER.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Linha 4-Amarela.

O estudo determinou, com exatidão, os alimentadores e trechos da rede aérea que necessitam de reforços para operação adequada de tal Linha, quando da conclusão da segunda fase (operação entre LUZ e VSO).

Foi indicada a necessidade de reforço nos seguintes alimentadores:

- Alimentador F41 de PVS, um cabo de 400mm^2 adicional;

- Alimentador F11 de CAX, um cabo de 400mm^2 adicional;

- Alimentador F21 de CAX, um cabo de 400mm^2 adicional;

- Alimentador F11 de PIN, um cabo de 400mm^2 adicional;

- Alimentador F41 de PIN, um cabo de 400mm^2 adicional;

- Alimentador F41 de FRA, um cabo de 400mm^2 adicional;

- Alimentador F11 de REP, um cabo de 400mm^2 adicional.

Constatada também a necessidade de reforços (incremento de 1kA em relação a corrente nominal atual) nos seguintes trechos da rede aérea:

- Via 1, CAX-PIN, PK 7.054 a PK 7.126 (72 metros);

- Via 2, PIN-FRA, PK 6.995 a PK 7.064 (69 metros);

- Via 2, FRA-PTA, PK 8.861 a PK 8.969 (108 metros);

- Via 1, HIG-REP, PK 13.771 a PK 13.931 (160 metros).

Os resultados apresentados em tal estudo correspondem aos constatados pelo CVA II, sendo eles muito próximos aos indicados por empresa internacional contratada pela concessionária para avaliação do assunto.

Assim sendo, foi consolidada a necessidade de execução dos reforços conforme estabelecido nas simulações efetuadas pelo Metrô e CVAII.

Linha 5 - Lilás.

Operação da Linha 5 anteriormente à Implantação da Estação Campo Belo (CPB).

Os valores máximos de corrente elétrica nos diversos alimentadores da Linha 5, considerando operação com 32 trens, são indicados na tabela abaixo.

				Condição NORMAL (sem TAS)		Condição YGC INOPERANTE (com TAS)	
		ALIMENTADORES	SEÇÃO NOMINAL ALIM.	CONDIÇAO	CORRENTE (A)	CONDIÇÃO	CORRENTE (A)

SETOR YGC	1	YGC-GGR AUX 1	1x150 mm²		108,6	INOPERANTE	0,00
	2	YGC-BL D1 AUX 2	1x70 mm²		44,1	INOPERANTE	0,00
	3	YGC-WGC TRA1	2x240 mm²		280,9	INOPERANTE	0,00
	4	YGC-VBE TRA2	2x240 mm²		276,1	INOPERANTE	0,00
	5	VBE-CPR TRA	1x150 mm²		145,4		93,7
	6	VBE-BL D TRA	2x150 mm²		68,4		150,9
	7	CPR-PCR TRA	1x150 mm²		70,5		64,8
	8	CPR-CPL TRA	1x150 mm²		5,1		44,4
	9	CPL-WGC TRA	1x150 mm²		95,1		127,3
	10	WGC-LTR TRA	2x150 mm²		124,3		184,3
	11	LTR-APN TRA	2x150 mm²		84,7		221,0
	12	APN-ABV TRA	2x150 mm²		35,9		266,4
	13	ABV-BL D TRA	2x150 mm²		14,88		240,0
	14	GGR-VBE AUX	1x70 mm²		37,3		35,6
	15	GGR-STA AUX	1x70 mm²		61,5		47,5
	16	VBE-CPL AUX	1x70 mm²		24,9		23,7
	17	CPL-CPR AUX	1x70 mm²		12,44		11,9
	18	CPR-PCR AUX	1x70 mm²	DESENERGIZADO	0,00	DESENERGIZADO	0,00
	19	STA-LTR AUX	1x70 mm²		48,7		58,9
	20	LTR-APN AUX	1x70 mm²		32,5		73,7

	21	APN-ABV AUX	1x70 mm²		16,2		88,8
	22	BL D1-BL A AUX	1x70 mm²		28,1		14,8
	23	BL A-BL D AUX	1x70 mm²	DESLIGADO	0,00	ENERGIZADO	40,7
TAS	24	ABV-BGA TRA	1x240 mm²	DESENERGIZADO	0,00	ENERGIZADO	276,9
	25	ABV-BGA TRA	1x240 mm²	DESENERGIZADO	0,00	ENERGIZADO	276,9
	26	ABV-BGA AUX	1x70 mm²	DESENERGIZADO	0,00	ENERGIZADO	104,2
SETOR YBN	27	YBN-MOE TRA1	2x240 mm²	Banco de Dutos	**447,4**		**981,3**
	28	**YBN-CPB TRA2**	**2x240 mm²**	**INOPERANTE**	**0,00**	**INOPERANTE**	**0,00**
	29	YBN-ECT AUX	1x150 mm²	Banco de Dutos	131,5		230,7
	30	MOE-HSP TRA	1x240 mm²		197,3		316,8
	31	HSP-CKB TRA	1x240 mm²		147,0		268,3
	32	CKB-SCZ TRA	1x150 mm²		108,0		230,9
	33	SCZ-SER TRA	1x150 mm²		66,8		191,4
	34	SER-ECT TRA	1x150 mm²		9,3		135,1
	35	ECT-BRK-TRA	1x240 mm²		56,7		74,4
	36	BRK-BGA TRA	2x150 mm²		119,2		19,31
	37	BGA-CPB TRA	**2x240 mm²**	EMENDADAS	**182,4**	EMENDADAS	**598,8**
	38	CPB-MOE TRA	**1x150 mm²**		**182,4**		**598,8**

	39	ECT-MOE AUX	1x70 mm²		82,1		80,1
	40	MOE-SER AUX	1x70 mm²		65,7		64,0
	41	SERV-HSP AUX	1x70 mm²		49,2		48,0
	42	HSP-SCZ AUX	1x70 mm²		32,8		32,0
	43	SCZ-CKB AUX	1x70 mm²		16,4		16,0
	44	ECT-CPB AUX	1x70 mm²	EMENDADAS	32,9	EMENDADAS	135,3
	45	CPB-BRK-AUX	1x70 mm²				
	46	BRK-BGA AUX	1x70 mm²		16,4		119,7

Tabela 1: máxima corrente nos alimentadores de Média Tensão.

Efetuando-se uma avaliação dos resultados com foco nas máximas ampacidades, para a condição de "YGC INOPERANTE (com TAS)", observa-se que acorrente circulante pelo alimentador "CPB-MOE TRA" (cabo 1x150 mm²), que estava emendado com o "BGA-CPB TRA" (2x240 mm²), fica além da ampacidade máxima, configurando uma sobrecarregada.

Observa-se também uma corrente elevada no alimentador "YBN-MOE", considerando-se o respectivo método de instalação dos cabos (banco de dutos).

Tendo em vista esta avaliação, foram realizadas simulações com o objetivo de encontrar uma condição de "operação" da Linha quando da realização do TAS (YGC inoperante, YBN responsável pela alimentação de toda Linha) que resultasse em valores de corrente compatíveis com as seções nominais dos cabos instalados

A seguinte alternativa foi transmitida à gestão operacional como subsídio para eventual decisão estratégica em caso de ocorrência da dupla degradação em avaliação: adoção de headway igual a 300 segundos e aplicação de restrição na velocidade máxima (50 km/h), bem como na taxa de aceleração (0,57 m/s^2).

Neste caso, seriam 16 trens em operação, com valor da corrente no alimentador "CPB-MOE TRA" igual a 301 A (abaixo da ampacidade máxima), e valor da corrente no alimentador "YBN-MOE TRA" igual a 462 A (abaixo da ampacidade máxima também).

Teste de Homologação da Via Permanente

Em relação aos testes de homologação da via permanente, as duas simulações realizadas através do software Elbas apresentam os resultados abaixo.

Simulação 1 (Trecho entre VSE Bandeirantes e VSE Dionísio da Costa).

Foi constatada a possibilidade de movimentação de um trem, nas condições relatadas, pois a tensão mínima observada foi de 1298Vcc (limite para atuação de subtensão no trem igual a 1.100 Vcc) na região do VSE Dionísio da Costa, que ocorre quando o trem parte em direção ao VSE Bandeirantes.

Os máximos valores de corrente constatados foram 2.110 A (região de ECT) e 2.643 (região de SER).

Os maiores valores de tensão negativo-terra registrados correspondem a 170 e 130 V, na região entre os marcos 20,7 e 21,2 km, verificados quando o trem parte do VSE Dionísio da Costa para o VSE Bandeirantes.

Simulação 2 (Trecho entre MOE e VSE Dionísio da Costa).

Foi constatada a possibilidade de movimentação de um trem, pois a tensão mínima observada foi de 1.247Vcc na região do VSE Dionísio da Costa, que ocorre quando o trem parte em direção ao VSE à MOE.

O máximo valor de corrente constatado corresponde a 2.784 (região de SER).

Os maiores valores de tensão negativo-terra registrados correspondem a 149 e 120 V, na região entre os marcos 20,7 e 21,2 km, verificados quando o trem parte do VSE Dionísio da Costa para MOE.

Pelo exposto, percebe-se que as simulações elétricas efetuadas indicaram a possibilidade de execução dos testes de homologação da via permanente sem restrições conforme estabelecido no respectivo procedimento, apesar da considerável restrição no SAL.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos através das simulações permitem aferir o dimensionamento dos sistemas de Tração Elétrica e Média Tensão, fornecendo subsídios para decisões operacionais, bem como para tomadas de decisões gerenciais, quando constatadas necessidades de reforços em tais Sistemas.

Os impactos, limites de desempenho e suportabilidade das subestações e redes de distribuição em corrente contínua e alternada, sob diferentes condições operacionais,

podem ser mensurados com segurança através da utilização de softwares apropriados e avaliação dos resultados extraídos.

Destaca-se a possibilidade de avaliação e determinação de critérios para operação dos Sistemas sob condições degradadas, quando uma ou mais subestações estiverem inoperantes, ou na ocorrência de indisponibilidade dos alimentadores que constituem as redes de distribuição.

Ressalta-se a importância das simulações para determinação dos limites do SAL quando da implantação gradativa das linhas metroviárias, ocasião em que o Sistema não estará completo, e, portanto, poderá oferecer limitações operacionais momentâneas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Pires, Cassiano Lobo – Engenharia Elétrica Ferroviária e Metroviária, do Trólebus ao Trem de Alto Velocidade, editora LTC.