

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

Adalberto de Paula Ramos – Metrô/SP André Luiz Pisani de Almeida – Metrô/SP Eduardo Marcello Casado – Metrô/SP Rodrigo Coura Oliveira – Metrô/SP Ruan Streitenberger Guedes – Metrô/SP





### Apresentação

- Rodrigo Coura Oliveira.
- 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).





# 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.





#### Realiza:

- Simulação de Marcha dos trens;
- Simulação Elétrica em Corrente Contínua.







- ➤ Nível I Preparação/Entrada de dados
  - Dados Linha:
    - Extensão;
    - Posição das estações/pontos de parada;
    - Velocidades máximas por trecho;
    - Perfil curvas, gradientes, túnel simples ou duplo.
  - Dados da Rede de Alimentação:
    - Características do retificador;
    - Localização das subestações;
    - Pontos de conexão dos alimentadores ao 3º trilho / catenária);
    - Características dos circuitos alimentadores e de retorno.





- Dados de Grade Horária (Time Table) da Linha:
  - Intervalo entre trens "Headway" operacional;
  - Tempo de parada nas Estações.
- Dados do Material Rodante:
  - Motorização por eixo, massa (vazio e carregado), nº de carros, velocidade máxima, aceleração e frenagem;
  - Curvas características:
    - Esforço de tração x velocidade;
    - Corrente x velocidade;
    - Esforços e corrente na frenagem regeneração;
  - Potência de serviços auxiliares.





- Nível II Processo de Simulação.
- Nível III Ferramentas de avaliação resultados
  - Tabelas
  - Gráficos
    - Grade Horária Operacional
    - Máxima e mínima tensão na captação
    - Corrente na linha de captação
    - Potência requerida da SE Retificadora
    - Tensão Negativo Terra estrutural





# Programa de Simulação CA - Etap

É um programa de análise do Sistema Elétrico de Potência, responsável pelos estudos de fluxo de potência e curtocircuito

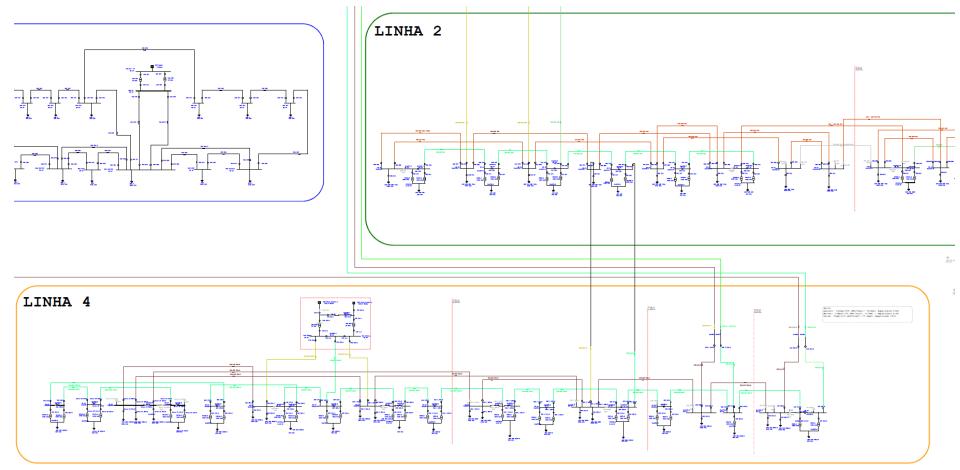






# Programa de Simulação CA - Etap

Permite a representação do Diagrama Unifilar de um sistema (nossa versão limitada a 100 barras)

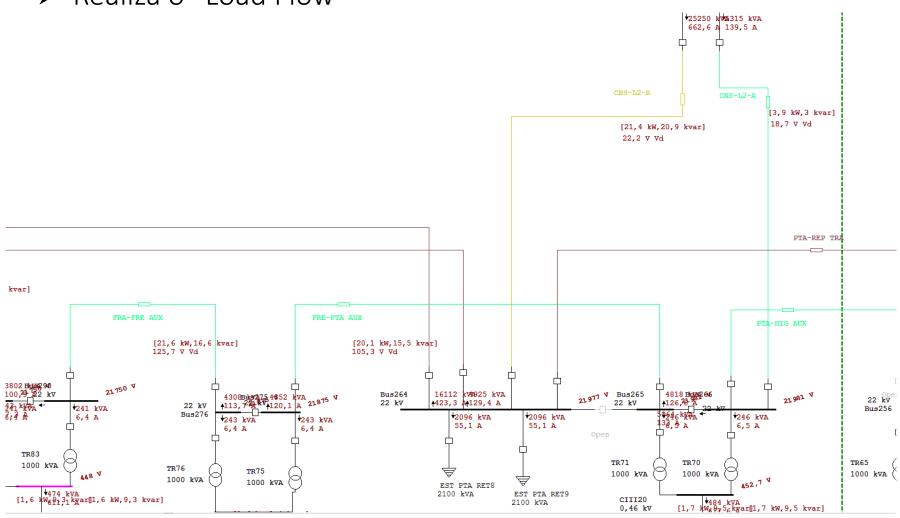






# Programa de Simulação CA - Etap

> Realiza o "Load Flow"







### **Estudo Realizados**

- ➤ Simulações CC e CA para a Linha 4, Amarela FASE II implantação das estações HIG, FRE, MBI e VSO
- ➤ Simulações CC e CA para a Linha 5 Lilás implantação do trecho entre as estações APN e CKB
- Apresentação de 4 casos:
- Reforço Sistema de Tração Elétrica, headway 90s;
- Operação da Linha 5 anteriormente à Implantação da Estação Campo Belo (CPB);
- Teste de homologação da Via Permanente Trecho entre VSE Bandeirantes e VSE Dionísio da Costa;
- Teste de homologação da Via Permanente Trecho entre MOE e VSE Dionísio da Costa.





- Simulações CC Linha 4 Amarela FASE II
- Objetivos:

Fornecer subsídios para validar o dimensionamento dos circuitos de potência, bem como dos equipamentos novos e existentes do sistema de alimentação elétrica, em atendimento às novas condições operacionais definidas como parâmetros de dimensionamento;





Condições Operacionais consideradas para a Simulação CC

- Geral
  - Intervalo entre trens 90 segundos;
  - Curvas de tração e frenagem do Trem Rotem
  - Tempo de parada nas estações 20 segundos
- Sistema de Alimentação Elétrica normal sem falha (todas as SE Retificadoras OK)
- Sistema de Alimentação Elétrica com falhas:
  - Falha em uma Subestação Retificadora um retificador inoperante;
  - Falha em uma Subestação Retificadora dois retificadores inoperantes.





#### Resultados obtidos:

O estudo determinou a necessidade de reforço, com um cabo adicional na saída dos alimentadores em relação ao implantado na FASE I, conforme indicado:

- F41/H41 de PVS, um cabo adicional de 400 mm<sup>2</sup>
- F11/H11 de CAX, um cabo adicional de 400 mm²
- F21/21 de CAX, um cabo adicional de 400 mm²
- F11/H11 de PIN, um cabo adicional de 400 mm²
- F41/H41 de PIN, um cabo adicional de 400 mm²
- F41/H41 de FRA, um cabo adicional de 400 mm²
- F11/H11 de REP, um cabo adicional de 400 mm<sup>2</sup>





- Conclusões decorrentes das Simulações CC
  - 2. O estudo determinou a necessidade de reforço da rede aérea ("catenária rígida") a fim de se ter um incremento de 1 kA, em relação ao implantado na FASE I, nos seguintes trechos:
    - Via 1, entre CAX e PIN, quilômetros 7054 a 7126 (72 metros);
    - Via 2, entre PIN e FRA, quilômetros 6995 a 7064 (69 metros);
    - Via 2, entre FRA e PTA, quilômetros 8861 a 8969 (108 metros);
    - Via 1, entre HIG e REP, quilômetros 13771 a 13931 (160 metros).





# Caso 2 - Operação da Linha 5 anteriormente à Implantação da Estação Campo Belo (CPB).

#### Objetivo:

Avaliar a necessidade de restrição operacional considerando a operação da Linha 5 - trecho compreendido entre o pátio Capão Redondo (PCR) e a estação Chácara Klabin (CKB) — sem o alimentador tronco R YBN-CPB.





# Caso 2 - Operação da Linha 5 anteriormente à Implantação da Estação Campo Belo (CPB).

- Condições Operacionais consideradas para a Simulação CA:
- Utilizado os resultados da Simulação CC para intervalo entre trens de 90, 120, 150 e 180 segundos, considerando o trem CAF (frota P), tempo de parada de 20 segundos e potência das retificadoras sem contingências no sistema.
- ❖ Sistema de Alimentação Elétrica CA normal sem anormalidade todos os pontos de alimentação (YBN e YGC) operacionais, excetuando-se alimentador R YBN-CPB
- ❖ Sistema de Alimentação Elétrica CA com contingência com anormalidade − realização daTransferência Automática de Setores (TAS):
  - Falha na Subestação Primária YBN : Primária YCG socorre o setor da primária YBN (YGC → YBN).
  - Falha na Subestação Primária YGC : Primária YBN socorre o setor da primária YGC (YBN → YGC).





# Caso 2 - Operação da Linha 5 anteriormente à Implantação da Estação Campo Belo (CPB).

#### Resultados obtidos:

- Necessidade de restrição operacional em caso de TAS, Subestação Primária YBN socorrendo o setor de YGC (YBN → YGC);
- Alternativa 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/s²).
- 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).





### Caso 3 - Teste de homologação da Via Permanente L5 - Trecho entre VSE Bandeirantes e VSE Dionísio da Costa

#### Objetivo:

Verificar possibilidade de realização do teste de homologação da via permanente, entre o VSE Bandeirantes e CKB, anteriormente ao comissionamento das subestações Hospital São Paulo (HSP), Santa Cruz (SCZ) e CKB.

- Condições do teste:
  - Seccionamento das vias na região do VSE Bandeirantes, ou seja, a região em teste permaneceu isolada eletricamente do trecho operacional;
  - Realização do teste na Via 2;
  - Utilização de um trem da frota F;
  - Carregamento AW4, com desempenho máximo (taxa de aceleração e velocidade máxima)
  - Inexistência de paradas nas estações intermediárias;
  - Gaps (isolating points) nas entradas das plataformas "jumpeados";
  - Catenárias das vias 1 e 2 conectadas;
  - Existência de crossbonds apenas em ECT e SER.





# Caso 3 - Teste de homologação da Via Permanente L5 - Trecho entre VSE Bandeirantes e VSE Dionísio da Costa

#### Resultados obtidos:

- 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.
- Máximos valores de corrente constatados:2.110 A (região de ECT) e 2.643 A (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.





# Caso 4 - Teste de homologação da Via Permanente L5 - Trecho entre MOE e VSE Dionísio da Costa

#### Objetivo:

Verificar possibilidade de realização do teste de homologação da via permanente entre as estaç MOE e CKB, após inauguração de ECT e anteriormente ao comissionamento das subestações Hospital São Paulo (HSP), Santa Cruz (SCZ) e CKB.

- Condições do teste:
- Seccionamento das vias na região de MOE, ou seja, a região em teste permaneceu isolada eletricamente do trecho operacional CPR-ECT;
- Realização do teste na Via 2;
- Utilização de um trem da frota F;
- Carregamento AW4, com desempenho máximo (taxa de aceleração e velocidade máxima)
- Inexistência de paradas nas estações intermediárias;
- Gaps (isolating points) nas entradas das plataformas "jumpeados";
- Catenárias das vias 1 e 2 conectadas;
- Apenas retificadora SER alimentando o trecho em teste.





# Caso 4 - Teste de homologação da Via Permanente L5 - Trecho entre MOE e VSE Dionísio da Costa

- Resultados obtidos:
  - 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 A (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.





### **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 adequada avaliação dos resultados extraídos.
- ➤ 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.







# **Obrigado!**



