

**AGNELO GOMES JÚNIOR
FÉLIX PRADO
RENATO FRANZON SOARES**

**ESTUDO DE DETECÇÃO PELO TREM DE TRILHO PARTIDO
EM TEMPO REAL PARA SISTEMAS METROVIÁRIOS**

**São Paulo
2010**

AGNELO GOMES JÚNIOR
FÉLIX PRADO
RENATO FRANZON SOARES

**ESTUDO DE DETECÇÃO PELO TREM DE TRILHO PARTIDO
EM TEMPO REAL PARA SISTEMAS METROVIÁRIOS**

Trabalho de conclusão apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo, Curso de Especialização
“latu-sensu” em Tecnologia Metro-
Ferroviária desenvolvido no âmbito do
Programa de Educação Continuada em
Engenharia - PECE

Orientador:
Prof. Dr. João Batista Camargo Júnior

São Paulo
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Gomes Júnior, Agnelo

**Estudo de detecção pelo trem de trilho partido em tempo real para sistemas metroferroviários / A. Gomes Júnior, F. Prado, R.F. Soares. – São Paulo, 2010.
p. 60**

Monografia (Especialização em Tecnologia Metro-Ferroviária). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1. Ferrovias 2. Vias permanentes 3. Trilhos I. Prado, Félix II. Soares, Renato Franzon III. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia IV. t.

AGRADECIMENTOS

À Secretaria dos Transportes Metropolitanos – STM, à Companhia do Metropolitanos de São Paulo – METRÔ, à Companhia Paulista de Trens Metropolitanos – CPTM e à Universidade Cooperativa - UNIMETRO, que propiciaram a realização deste curso.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, através de seu Programa de Educação Continuada em Engenharia – PECE e em especial ao Prof. Dr. João Batista de Camargo Júnior, pela orientação e dedicação ao grupo.

Aos nossos familiares, pelo apoio e compreensão em todos os momentos.

Às pessoas do Metrô – SP que direta ou indiretamente nos auxiliaram no decorrer do nosso trabalho:

- Gerência de Manutenção GMT/AST – José Carlos Mora;
- MTE/ENC - Jorge Luiz Gomes e Ricardo Asp;
- MTR/MRN - Carlos Adriano Perez Pinto;
- MTT/EPN – Richard Drabek e Francisco Carlos Mathias;
- MTT/EPV – João Carlos Torraque da Costa;
- Gerência de Operação GOP/OPT - Rubens Bullara;
- Gerência de Projetos GCS/CSL - Waldir Guerra, Carlos Alberto de Freitas Timóteo, Fábio Tadeu Alves, Fernando de Barros Ragognette e Rubens Navas Borloni.

DEDICATÓRIAS

Agnelo Gomes Júnior dedica este Trabalho:

- A memória de Neyde Franzon Gomes, minha mãe, e de Carlos Eduardo Gomes, meu irmão;
- A Elaine Cristina Saito de Moraes Gomes, minha esposa, Felipe Saito de Moraes Gomes e Luísa Saito de Moraes Gomes, meus filhos, ambos os pilares do meu ser.

Félix Prado dedica este Trabalho:

- A memória de Rosalina Mendes do Prado, minha Mãe, e de Sérgio Prado, meu Pai, alicerces da minha vida;
- Aos meus irmãos, Alexandre Prado e Ériko Prado pelo apoio e compreensão na minha família;
- A cantora Britânica de Pop Rock Alternativo e Experimental – Kate Bush – cujas canções são fontes para minha inspiração intelectual desde 1978;
- A memória do Padre Humberto de Santana Galvão – Convento de Santa Teresa das Carmelitas Descalças – pelos seus ensinamentos e virtudes;
- A Ivone Barcellos, Diretora da “EEPG Érico de Abreu Sodré” em 1982, pela confiança e acolhida em seu lar, em um momento crucial de minha vida;
- Ao meu amigo Fernando de Barros Ragognette desde 1995, pela acolhida e exemplo em sua família.

Renato Franzon Soares dedica este Trabalho:

- A memória de Miguel Pereira Soares, meu Pai;
- A Cleide Franzon, minha Mãe, e Estela Valença Dantas, minha esposa, pelo apoio, e a Nicolas Dantas Franzon Soares, meu filho, motivo de minha felicidade.

RESUMO

O Sistema de Controle de Trens Baseado em Comunicação (CBTC – Communication Based Train Control), com o uso de tecnologia baseada em comunicação contínua e bi-direcional via-trem, não realiza a função auxiliar de detecção de trilhos partidos, impossibilitando, assim, a sua detecção em tempo real. A proposta deste trabalho consiste na elaboração de estudos e geração de recomendações, baseada na metodologia de monitoração do sinal de 720 Hz presente na corrente de tração elétrica de retorno pelos trilhos de rolamento, de forma embarcada, através das antenas de sinal de via do trem, possibilitando ao Metrô-SP adotar uma nova alternativa para detecção de trilhos partidos.

ABSTRACT

The Train Control System Based on Communication (CBTC - Communication Based Train Control), using technology based on continuous communication and bi-directional way-train, does not perform the helper function to detect broken rails, preventing thus their detection in real time. The purpose of this work is the preparation of studies and generation of recommendations, based on the methodology of monitoring the signal of 720 Hz in this current electric traction return rails by rolling, so embedded by the train track signal antenna, allowing the Metro-SP to adopt a new alternative for the detection of broken rails.

SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E DEFINIÇÕES	1
1 INTRODUÇÃO	6
1.1 OBJETIVO.....	8
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	9
2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	11
2.1 HISTÓRICO DE FALHAS E EVOLUÇÃO DE OCORRÊNCIAS.....	14
3 CONCEPÇÃO DOS SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DO METRÔ-SP.....	17
3.1 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DE ALTA TENSÃO	17
3.2 SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS	17
3.3 SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DO TREM	21
3.4 SISTEMA DE TRAÇÃO E FRENAGEM DO TREM.....	22
4 SISTEMA ATC DO TREM.....	23
5 METODOLOGIA, LOCAIS DE TESTES, CENÁRIOS TEÓRICOS E RESULTADOS	25
5.1 METODOLOGIA APLICADA.....	25
5.2 LOCAIS DE TESTES	26
5.2.1 Pátio Jabaquara.....	26
5.2.1.1 Considerações preliminares dos registros do mapeamento no Pátio Jabaquara....	26
5.2.2 Via Principal.....	27
5.2.2.1 Considerações dos registros do mapeamento na linha comercial	28
5.3 APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS TEÓRICOS, CENÁRIOS PRÁTICOS E RESULTADOS.....	28
5.3.1 Cenário 1 - Região de fim de via	29
5.3.1.1 Análise Teórica	29
5.3.1.2 Resultado Prático	30
5.3.2 Cenário 2 – Passagem do trem sobre a região de AMV.....	31
5.3.2.1 Análise Teórica.....	31
5.3.2.2 Resultado Prático	32
5.3.3 Cenário 3 - Região da conexão do Retorno Negativo	34
5.3.3.1 Análise Teórica	34

5.3.3.2 Resultado Prático	36
5.3.4 <i>Cenário 4 - Região entre conexões do retorno negativo</i>	38
5.3.4.1 Análise Teórica	38
5.3.4.2 Resultado Prático	39
5.3.5 <i>Cenários Práticos Avaliados e Resultados</i>	39
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS E RECOMENDAÇÕES.....	43
6.1 <i>ANÁLISE DOS CENÁRIOS VIÁVEIS E LIMITAÇÕES ENCONTRADAS</i>	43
7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	48
REFERÊNCIAS	50

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E DEFINIÇÕES

Agulha – É a parte móvel integrante do Aparelho de Mudança de Via (AMV).

Alma – É a parte estreita e vertical do trilho, entre o boleto e o patim.

Antenas - São dispositivos utilizados para permitirem a transferência dos sinais de código de velocidade entre o ATC a bordo dos trens e o subsistema de Proteção Automática de Trens (ATP) de estações e vias.

Aparelho de Mudança de Via (AMV) – Conjunto de mecanismos que permite a modificação da direção de movimento de trens e veículos de manutenção, de uma via para outra.

ATC – Controle Automático de Trens.

ATO – Operação Automática de Trens.

ATP – Proteção Automática de Trens.

ATS – Supervisão Automática de Trens.

Automatismo Total – Não necessidade de quaisquer operadores para o funcionamento do Sistema de Supervisão e Controle de Tráfego.

Autorização Limite de Movimento (ALM) – Posição segura definida pelo sistema que não pode ser ultrapassada pelo trem.

Banco de Dados da Manutenção (BDM) – Conjunto de informações referentes a manutenção, ao seu pessoal, aos eventos e ocorrências com máquinas, equipamentos, seu cadastramento e seus códigos, sendo divulgadas ou não.

Balisa – Equipamento utilizado como instrumento de aferição da posição dos trens.

Barras “shunt” - São utilizadas para delimitar o tamanho dos circuitos de via e equalizar a tensão entre os trilhos e estabelecer um equilíbrio da corrente de retorno.

Bloco Fixo – Representa um trecho de via, também denominado de circuito de via.

Bloqueio – Componente Lógico designado para delimitar a região de AMV's.

Boleto – É a parte superior do trilho onde se apoiam e são guiadas as rodas dos veículos metroferroviários.

Bonde de Impedância – Conector elétrico com impedância, que permite o retorno a Subestação, pelos trilhos, da corrente elétrica de tração e veda a passagem da corrente elétrica de sinalização.

Chopper – Módulo do trem que atua no chaveamento para o controle da corrente dos motores, tanto na propulsão como no freio dinâmico ou regenerativo.

Centro de Controle Operacional (CCO) - Local designado para realizar a supervisão e controle centralizado das linhas do Metrô-SP.

Circuito de Via (CDV) – Representa o segmento de via onde é possível detectar a presença de um trem.

Caixa à Margem de Via (CMV) - Equipamentos instalados na via, que são adjacentes às Passarelas de Emergência.

CBTC – Controle de Trens Baseado em Comunicações.

CMSP – Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô-SP.

Composição – Trem ou veículo auxiliar.

Controle de Tráfego – Conjunto de recursos (Hardware e Software) responsáveis pelo Controle e supervisão de todos os elementos envolvidos na movimentação segura de composições em uma via ou trecho de via, evitando choques frontais e laterais entre elas e permitindo que se sigam uns aos outros.

Deteção de Trens – Função executada pelo Sistema ATP, que consiste em determinar se existe alguma composição em um circuito de via.

Driverless – Operação Automática (sem operador).

Falha - Término da capacidade de um item desempenhar uma função requerida.

Freio de emergência - Define uma classe de aplicação de frenagem em determinadas situações de risco, identificadas pelo sistema, que não serão atendidas pelo freio de serviço.

Intertravamento – Conjunto de bloqueios e dispositivos de controle interligados de maneira a funcionar em sequência apropriada, permitindo o movimento de trens, dentro da rota sob controle, somente em condições de segurança.

Jacaré Móvel – É o equipamento móvel que permite, conjuntamente com a agulha, direcionar o movimento de trens e veículos auxiliares, nas regiões de AMV.

Jerk – Variação da aceleração no tempo.

Juntas Isolantes – Dispositivos que têm como função permitir o acoplamento mecânico de duas seções de um trilho, mantendo-as isoladas eletricamente. São do

tipo colado, com uma isolação adequada das frequências utilizadas para detecção de ocupação e transmissão de códigos de velocidade, isto é, na faixa de 0 a 10 kHz.

Headway – Representa o intervalo de tempo entre dois trens. É calculado para o trajeto da linha inteira considerando inclusive o tempo de parada e manobra no fim da via.

IEEE-1474-1 – Norma que define os requisitos funcionais e de desempenho do sistema CBTC.

Leiaute – É o mecanismo que conecta a máquina de chave às barras de conjugação do aparelho de mudança de via – AMV - agulha e jacaré móvel, transmitindo-lhe movimento.

Limite de velocidade civil – É a velocidade máxima determinada pelo projeto da via considerando curvas, retas, inclinação (grade) e equipamentos instalados na via.

Máquina de Chave – É o dispositivo eletromecânico que movimenta, trava e detecta a posição das agulhas e dos jacarés dos AMV's.

Manual – Modo de condução do trem sem supervisão do Sistema ATC de bordo.

Manutenção Corretiva – Ação de manutenção após a ocorrência de uma falha de um item, ou de qualquer de seus elementos, com o objetivo de restaurar o item, ou seus elementos, ao estado no qual ele tem a capacidade de desempenhar a função requerida.

Manutenção Preventiva – Ação de manutenção executada a intervalos pré-determinados, conforme critérios preestabelecidos, com o objetivo de reduzir a probabilidade de ocorrência de falha ou de degradação do desempenho do item.

Mapa da via – Representa algumas características técnicas da via, visando o controle de movimentação dos trens. Exemplo: grade, curvas, restrições civil, etc.

MCH - Máquina de Chave.

MCS – Modo de condução semi automática do trem.

MUX – Equipamento Multiplex.

NBR 7590 – Trilho “Vignole” - Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

On board – Processamento realizado pelo controle à bordo dos trens.

Operação Comercial – Período compreendido entre o horário das 04H:40min e 24:00H, em que há circulação de trens e prestação de serviço remunerado aos

usuários – viagens de embarque e desembarque nas estações das Linhas operacionais do Sistema Metrô-SP.

Patim – É a parte inferior do trilho, mais larga, que se assenta no dormente direta ou indiretamente.

Perfil de velocidade – Velocidades dinâmicas estabelecidas pelo sistema.

Ponto Alvo ou Ponto de Conflito - Posição segura definida pelo sistema que não pode ser ultrapassada pelo trem.

Restrição de velocidade – É um limite de velocidade imposto pelo sistema em um determinado trecho de via.

Rota - Trecho da via permanente, contendo ou não AMVs, a ser percorrido por um trem.

Rota Direta – Rota que utiliza o AMV na posição normal.

Rota Reversa – Rota que utiliza o AMV na posição reversa.

Sala Técnica - Salas localizadas no Centro de Controle Operacional, nas estações e pátios, destinadas a instalação de equipamentos do sistema.

SAT – Supervisão Automática de Trens.

SIGMA – Sistema de Informações Gerenciais da Manutenção do Metrô-SP.

Sinal / Função Vital – Sinal diretamente relacionado à Segurança do Sistema.

Sinal / Função não Vital - Sinal não relacionado à Segurança do Sistema.

Sistema Auxiliar de via – Equipamentos que auxiliam na proteção da movimentação dos trens, incluindo a substituição do CBTC nos casos de degradação para realizar a detecção dos trens.

Sentido de Movimento – Define o sentido de movimento dos trens na via.

SSCT – Sistema de Sinalização e Controle de Trens.

Talas de Junção – São talas que unem duas barras de trilho e servem para estabelecer a continuidade do trilho, ligando uma barra a outra.

Trilho – Elemento da superestrutura da via permanente que constitui a superfície de rolamento para as rodas dos veículos metroferroviários. É composto de três partes: boleto, alma e patim.

Via Principal – Extensão de trilhos percorridos pelo trem, com exceção dos Pátios de Manobra dos trens.

Zona de Controle – Região da via que tem a capacidade de controlar um número determinado de trens.

Zona de Manobra – Trecho da via, utilizado para manobras de retorno de trens.

Zona de Transferência – Região de interligação entre a via principal e o Pátio.

1 INTRODUÇÃO

O Planejamento Estratégico 2007-2010 elaborado no Metrô-SP prevê a Modernização dos Sistemas de Sinalização e Controle de Trens – SSCT [1], com a implantação dos Sistemas de Controle de Trens Baseado em Comunicação (CBTC – Communication Based Train Control) e com o uso de tecnologia baseada em comunicação contínua e bi-direcional via-trem, conforme ilustrado na figura 1 a seguir [2].

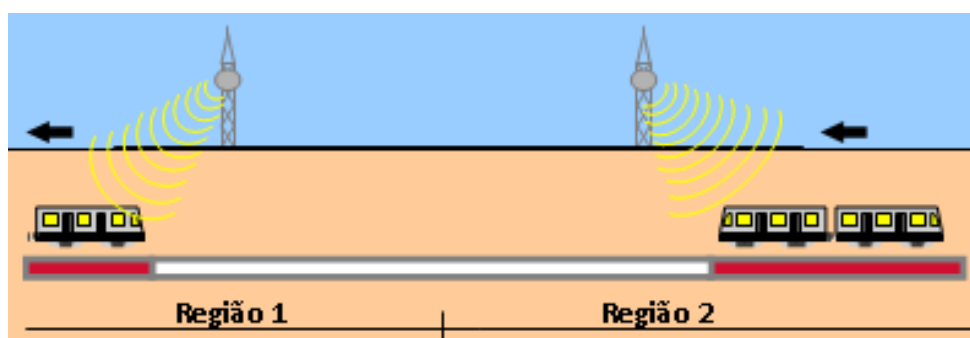


Figura 1 – Sistema CBTC

Por não necessitar de informações de circuitos de via (CDV), conforme ilustrado na figura 2 a seguir, e utilizar modernas técnicas de radiocomunicação ("Spread Spectrum" ou GSM-R), o Sistema CBTC pode ser sobreposto aos atuais sistemas sem a necessidade de interrupção de serviço nas Linhas 1-Azul, 2 – Verde, 3 – Vermelha e 5 – Lilás do Metrô-SP, em substituição ao Sistema de Sinalização Convencional atualmente implantado que possui tecnologia de "Bloco Fixo", de forma a proporcionar elevação do patamar atual de automação do Sistema, de confiabilidade, disponibilidade e segurança do Sistema e melhorias no seu desempenho operacional, além de serem menos custosos e apresentarem flexibilidade de implantação e testes sem interferência na Operação Comercial [3].

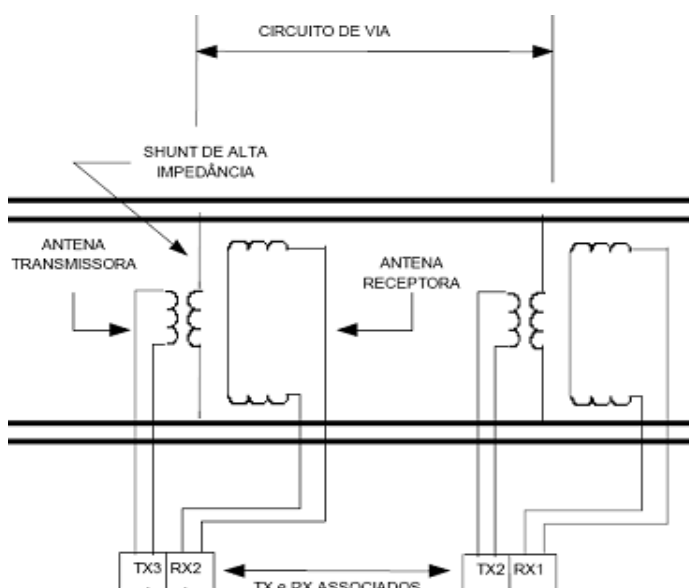


Figura 2 – Sistema de Circuito de Via convencional

Por se tratar de uma inovação tecnológica sem precedentes no país e que possui uma concepção totalmente diferente da atual, muitas funcionalidades e mecanismos de diagnósticos adotados atualmente não serão mais aplicáveis, e outros novos surgirão.

O Sistema de Sinalização Convencional possui uma função auxiliar de detecção de trilho partido e, para detecção de trincas e fissuras, a solução adotada atualmente no Metrô-SP é baseada na utilização de ultrassom, implicando na realização de inspeções periódicas, fora do horário comercial e em trechos de via, utilizando-se de um veículo especial. Com a implantação do Sistema CBTC, sem o Sistema de Sinalização Convencional, as inspeções por ultrassom devem ser realizadas com menor periodicidade, agregando um custo maior para a manutenção da via permanente, através da aquisição de mais veículos especiais e contratação de mão de obra especializada, que, além de não serem efetivos por não detectarem trilho partido em tempo real, impactam na realização de outras atividades de manutenção na via permanente.

Uma questão a ser colocada, refere-se à manutenção do Sistema de Sinalização Convencional existente, com a necessidade de adequações no Sistema de Supervisão e Controle apenas para detecção de trilhos partidos.

Outro fator importante é a inexistência de produtos comerciais para detecção de trilhos partidos no mercado.

Em 2004, pesquisadores da Universidade de Warwick [4], na Inglaterra, desenvolveram um novo método sem contato que utiliza um método particular de ultra-som - uma onda Rayleigh de baixa frequência e banda larga - para se detectar e medir trincas e fissuras em trilhos ferroviários, de forma embarcada e em velocidade operacional. Após 5 anos da apresentação do estudo, nenhum produto baseado no novo método foi lançado, presumindo-se dificuldades na sua viabilização técnica- comercial.

A proposta do trabalho refere-se ao estudo para avaliar um sistema de detecção de trilho partido embarcado no trem, que realize medições enquanto o trem trafega em velocidade comercial. Assim, potencialmente, cada trem se transforma em um detector de trilho partido em tempo real, através da monitoração contínua da corrente de tração elétrica de retorno pelos trilhos de rolamento, permitindo ao Sistema de Supervisão e Controle impor um perfil de velocidade seguro à circulação de trens onde ocorrer tal problema.

Tal proposta não elimina as inspeções periódicas de ultrassom realizadas atualmente no Metrô-SP, mas possibilita a manutenção das condições de segurança do sistema e, também, o descomissionamento do Sistema de Sinalização Convencional, reduzindo os custos de manutenção.

1.1 OBJETIVO

Apresentar os estudos desenvolvidos para detecção de trilho partido, em tempo real, por meio de um sistema embarcado no trem, possibilitando a expansão e/ou modernização das Linhas com o Sistema CBTC, sem a utilização do Sistema de detecção de trilho partido atual, através do Sistema de Sinalização Convencional.

A proposta deste trabalho consiste na elaboração de estudos e geração de recomendações, baseada na metodologia de monitoração do sinal de 720 Hz presente na corrente de tração elétrica de retorno pelos trilhos de rolamento, de

forma embarcada através das antenas de sinal de via do trem, que possibilitem ao Metrô-SP adotar uma nova alternativa para detecção de trilhos partidos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 1 – INTRODUÇÃO**

É relatada de forma sucinta uma introdução contendo a motivação do trabalho, qual é seu objetivo e como ele foi estruturado.

- **Capítulo 2 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA**

É apresentada uma síntese do histórico de falhas, evolução das ocorrências, a concepção do Sistema de Alimentação Elétrica e do 3º Trilho, os subsistemas do trem e a bordo do trem.

- **Capítulo 3 – CONCEPÇÃO DOS SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DO METRÔ-SP**

É apresentada uma visão geral dos Sistemas de Alimentação Elétrica de Alta Tensão, de Subestações Retificadoras, de Alimentação Elétrica do Trem e de Controle de Tração e Frenagem do Trem.

- **Capítulo 4 – SISTEMA ATC DO TREM**

É apresentada uma visão da configuração do Sistema de Controle Automático do trem, suas características e interfaces.

- **Capítulo 5 – METODOLOGIA, LOCAIS DE TESTES, CENÁRIOS TEÓRICOS E RESULTADOS**

Aborda toda a metodologia adotada para a realização deste trabalho, a descrição dos cenários e configurações da via permanente onde se identifica locais limitantes à proposta. Apresenta ainda o conjunto de dados obtidos nos testes realizados na via.

- **Capítulo 6 – ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS E RECOMENDAÇÕES**

É apresentada uma análise dos testes realizados abordando os cenários viáveis e as limitações encontradas, bem como a geração das recomendações.

- **Capítulo 7 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

São apresentadas as considerações finais, ganhos, expectativas e os próximos desafios;

- **REFERÊNCIAS**

São apresentadas todas as fontes de consulta, referências de literaturas e trabalhos utilizados para a elaboração desta monografia.

2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de não detecção de trilhos partidos é um assunto de grande importância na operação metroferroviária, por afetarem, não somente a segurança do Sistema, como, também, a oferta de trens e economia nos custos de manutenção:

- Segurança: uma fratura de trilho pode acarretar acidentes de grandes proporções no Sistema;
- Oferta de trens: diminuição do número de trens ofertados para o transporte dos usuários, devido à restrição na velocidade de circulação dos trens e na passagem pelo trecho da via permanente em falha;
- Economia: desgaste e avarias prematuras marcam pesadamente os custos de manutenção.

Dentre os materiais que compõe a fabricação dos trilhos, o aço é o que oferece as melhores vantagens. Seus principais componentes são: ferro, carbono, manganês, silício e fósforo enxofre, sendo o ferro responsável por 98% da sua composição e os demais componentes por 2%, sendo estes responsáveis pelas características de dureza e elasticidade, entre outras.

O perfil básico utilizado em trilhos metroferroviários convencionais é o tipo *Vignole*, que é composto por boleto, alma e patim, definido pela NBR 7590 e apresentado na Figura 3 abaixo [5].

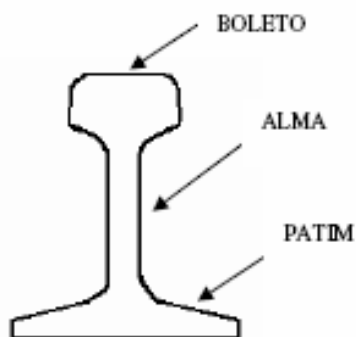


Figura 3 – Perfil Vignole

O limite geralmente estabelecido para o desgaste do trilho é de 25% da área total do boleto, ou seja, da seção transversal. A Figura 4, a seguir, ilustra uma condição de desgaste do trilho [6]:

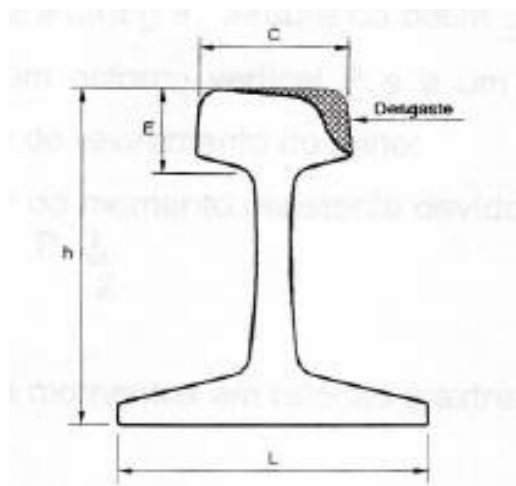


Figura 4 – Ilustração do desgaste do trilho

Há várias razões que concorrem para o surgimento de falhas relativas a trilhos partidos, como, por exemplo [5]:

- Vibração devido à passagem dos trens;
- Defeitos de fabricação, como fissuras que podem vir a se tornar fraturas;
- Rodas quentes, que podem alterar as características metalúrgicas dos trilhos;
- Baixas temperaturas, em tempos frios ou chuvosos;
- Lastros em que os dormentes podem, eventualmente, não prover o apoio adequado ao rolamento dos trens.

No Metrô-SP, o conceito de manutenção preventiva, atualmente empregado, tem como princípio a inspeção de falhas internas nos trilhos, através da utilização de sinais de ultrassom, que são injetados nos trilhos e são refletidos quando encontram anomalias internas, através de sensores direcionados em diferentes ângulos de verificação. Estas reflexões são, então, comparadas contra padrões conhecidos e, assim, são possíveis as caracterizações das anomalias detectadas.

Este método possibilita realizar a detecção de anomalias devidas a trincas ou fissuras, que se desenvolvem internamente e no topo do boleto, porém, não é realizada em tempo real com a velocidade de passagem dos trens no trecho de via com trilho danificado, podendo, somente ser realizada após o término da Operação Comercial do Metrô-SP, ou seja, sem a circulação de trens no trecho de via considerado em falha.

Todas estas situações são particularmente perigosas, porque são consideradas como casos de pontos críticos que tenderão levar a futuras situações que desencadearão o surgimento de trilho partido, que possibilitam o descarrilamento de trens.

Tais anomalias podem ser desenvolvidas tanto no sentido vertical como horizontal dos trilhos de rolamento. A Figura 5 a seguir apresenta a ilustração de uma trinca transversal, que poderia dar origem a uma fratura quando o trilho estiver sob carga [5]:



Figura 5 – Ilustração de fissura transversal no trilho de rolamento

2.1 Histórico de Falhas e Evolução de Ocorrências

Em consulta ao Banco de dados da Manutenção (BDM) da Gerência de Manutenção - GMT do Metrô-SP [7], denominado “SIGMA – Sistema de Informações Gerenciais da Manutenção”, foi possível encontrar dados relativos à ocorrências de falhas referentes a trincas e rupturas de trilhos, que, em algumas vezes, implicaram na imposição de restrição de velocidade em determinados trechos de via na linha operacional, em função de ocorrência de “falsa ocupação fixa” no circuito de via associado ao trilho com falha, ou seja, presença de ocupação gerada pela descontinuidade elétrica do circuito de via associado e acarretando interferência operacional na circulação dos trens no trecho de via penalizado. Em outras situações, não houve a necessidade de imposição de restrição de velocidade no trecho com trilho, mas implicaram na abertura de falha com atuação dos técnicos de manutenção do Metrô-SP.

No Metrô-SP, a média anual é de 2 ocorrências de trilho partido, conforme histórico da Manutenção.

Destacam-se algumas situações relevantes de atuações das equipes de manutenção corretiva (Restabelecimento do Sistema) e preventiva (Via Permanente):

“- Em 16/05/2003, foi aberta uma falha de trilho trincado sem impedir o tráfego na via 1 ao norte da estação Vergueiro na Linha 1-Azul, sendo acionada a equipe de manutenção de Via Permanente que efetuou a substituição do trilho trincado após o término da Operação Comercial, sendo realizados ensaios de ultrassom em duas soldas de fechamento para liberação da falha”.

“- Em 22/07/09, após a abertura da falha de “falsa ocupação fixa” no CDV 1E02T da estação Bresser na Linha 3-Vermelha, foi verificado pela equipe de manutenção corretiva um barulho quando o trem prosseguia na modalidade manual devido à restrição de velocidade imposta pelo CCO. A equipe deslocou-se imediatamente para a Via Permanente, onde foi verificada uma ruptura vertical do trilho e informado ao CCO, sendo solicitado que os trens a partir do código zero, prosseguissem em manual até a Plataforma da estação Bresser. Providenciado o kit Tala de Junção,

sendo instalado para imobilização do trilho fraturado (trilho B) e normalização do CDV 1E02T, sendo constatado que o trilho seccionou verticalmente com uma abertura de aproximadamente 4mm. No horário de pico da Operação Comercial, o trecho ficou sem restrição de velocidade, possibilitando a normalização da circulação dos trens na modalidade ATO. Acionada equipe de manutenção da Via Permanente para atuação e substituição do segmento de trilho fraturado após o término da Operação Comercial, eliminando-se a falha ocorrida no trecho de via mencionado”.

A Tabela 1 a seguir, apresenta um quadro-resumo dos tipos de ocorrências relativas falhas e atuações na via permanente, registradas no Metrô-SP, no período de amostragem compreendido entre o ano 2000 e o ano 2009:

NATUREZA DA OCORRÊNCIA						
ANO	AT	DM	MP	OC	SS	TOTAL
2000	---	16	---	---	2	18
2001	---	22	---	---	---	22
2002	---	36	---	---	1	37
2003	1	158	---	13	3	175
2004	1	141	---	33	6	181
2005	---	107	---	23	23	153
2006	1	112	1	25	23	162
2007	---	105	1	13	6	125
2008	---	115	---	23	15	153
2009	---	66	---	22	8	96
TOTAL (GERAL)	3	878	2	152	87	1122

Tabela 1 – Tipos de ocorrências de falhas e atuações na via permanente

SIGLA	SIGNIFICADO TÉCNICO
AT	Solicitação de intervenção após análise técnica e estudo da Engenharia
DM	Defeito detectado pela Manutenção durante a atividade de inspeção periódica
MP	Manutenção preventiva programada
OC	Ocorrências de falhas durante a operação comercial
SS	Solicitação de serviços gerais

Legenda 1 – Siglas da natureza da ocorrência

O gráfico 1 a seguir, apresenta uma amostragem dos tipos de ocorrências relativas falhas e atuações na via permanente no Metrô-SP, no período considerado.

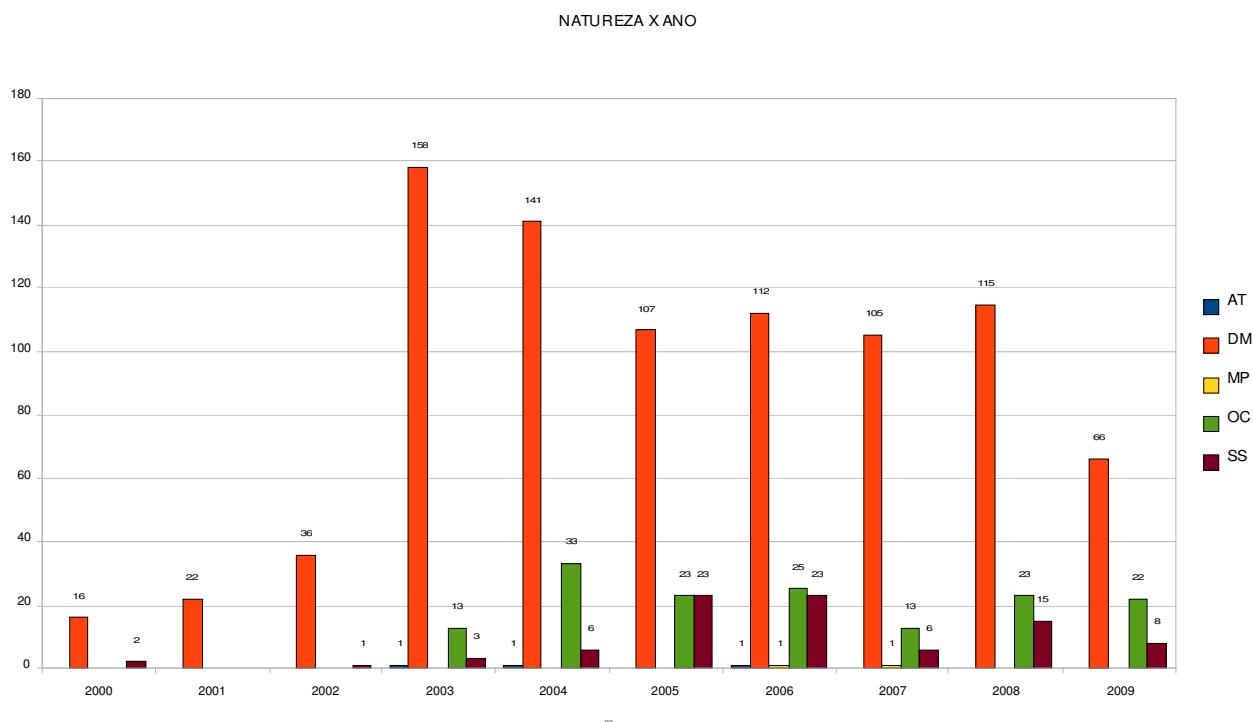


Gráfico 1 – Amostragem das ocorrências de falhas e atuações na via permanente

3 CONCEPÇÃO DOS SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DO METRÔ-SP

3.1 Sistema de Alimentação Elétrica de Alta Tensão

A energia elétrica fornecida em corrente alternada trifásica, frequência de 60Hz, na tensão nominal atual de 88 kV é efetuado pela Concessionária e geralmente em três pontos distintos ao longo de uma Linha. Esta arquitetura tem o objetivo de aumentar a confiabilidade e disponibilidade da alimentação. Cada ponto de fornecimento da Concessionária, entra em uma subestação que chamamos de Primária, onde a tensão é rebaixada para 22 kV [8].

3.2 Subestações Retificadoras

Uma subestação retificadora tem por finalidade principal receber 22KV em corrente alternada de uma Subestação Primária, transformar esta tensão em 750Vcc e alimentar o terceiro trilho através dos “feeders”.

Os retificadores são compostos por duas pontes de Graetz de seis pulsos ligadas em paralelo e defasadas de 30°. A montagem em ponte de Graetz dupla pode ser observada na figura 6, onde o transformador comporta dois enrolamentos secundários, um ligado em estrela e o outro ligado em triângulo, constituindo dois sistemas defasados de 30°. Cada secundário alimenta uma ponte de Graetz trifásica. A ligação entre estas duas pontes é feita em paralelo, através da conexão dos terminais k1 com k2 e A1 com A2, conforme apresentado na figura 6 a seguir [9].

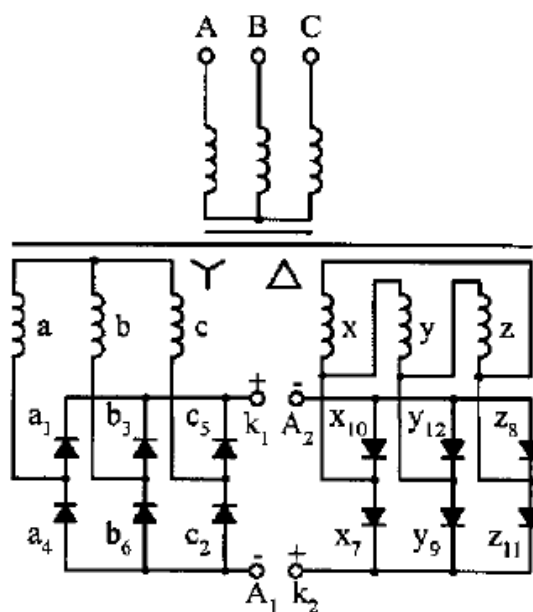


Figura 6 - Ponte de Graetz dupla

Quando duas pontes são ligadas em paralelo, apesar das tensões médias serem iguais, as tensões instantâneas diferem substancialmente devido à defasagem de 30° entre elas. Para que esta diferença seja eliminada, um transformador (ou bobina) de interfase é inserido entre as duas pontes. O transformador de interfase permite uma operação independente das duas pontes retificadoras. Enquanto os transformadores das duas pontes forem perfeitamente simétricos, o transformador de interfase irá operar como um dispositivo de divisão de corrente, e não haverá interação entre as pontes.

Como característica da ponte dupla de Graetz tem-se o fornecimento de uma tensão de saída com uma ondulação de 12 pulsos. Um fator de ondulação (ripple) de 12 pulsos na tensão de saída é desejável na operação de motores de tração em corrente contínua e inversores que requerem uma interferência mínima de ondulação da linha nas frequências de saída.

A alimentação, em corrente contínua do 3º Trilho, que faz parte do sistema elétrico do Metrô-SP [8], é efetuada através de ligações diretas, por cabos, nas subestações

retificadoras, localizadas nas Salas Técnicas das Estações, conforme apresentado na figura 7 a seguir.

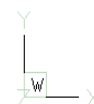
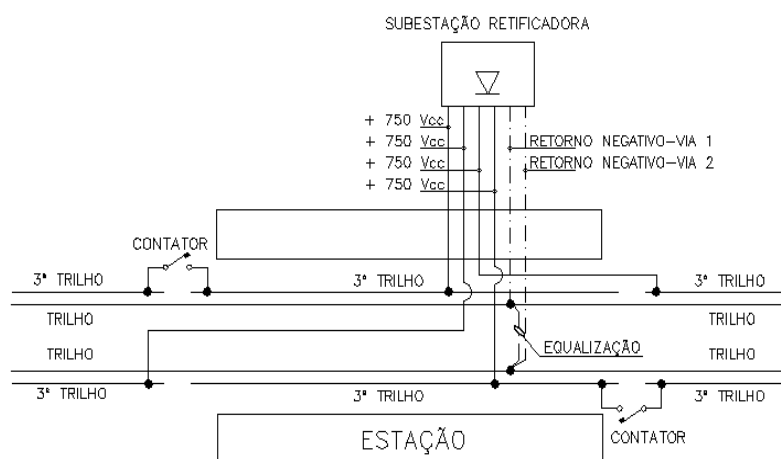


Figura 7 – Alimentação do 3º Trilho em corrente contínua

Ao longo do 3º Trilho das duas vias, são instalados seccionadores e contatores que permitem efetuar operações de manobra em todos os pontos onde existir a interrupção da continuidade da linha de contato.

O retorno da corrente às subestações retificadoras é efetuado pelos trilhos de rolamento da via permanente, através de equipamentos de via da Sinalização conectados aos trilhos. A fim de se conseguir a distribuição mais uniforme possível da corrente de tração no circuito de retorno, são efetuadas ligações transversais entre trilhos de rolamento da mesma via, assim como entre os trilhos das duas vias. A figura 8, a seguir, ilustra esta distribuição.

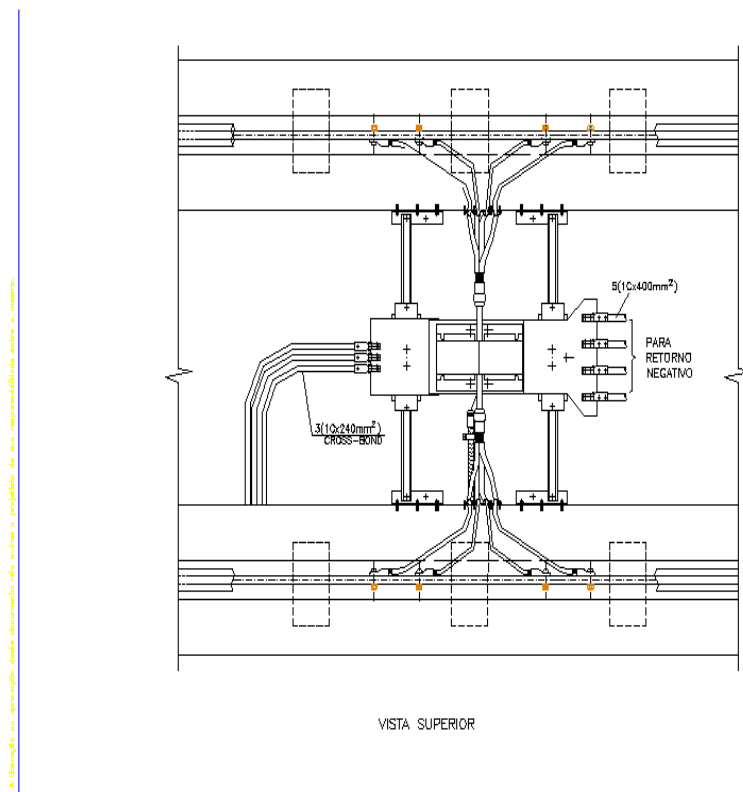


Figura 8 – Conexão da corrente de retorno aos trilhos

As seccionadoras de equalização, normalmente abertas, são conectadas a "gaps" de 3º Trilho posicionadas sempre nas entradas das plataformas.

Dessa maneira, as transferências de contato das sapatas coletoras dos trens se verificam quando esses estiverem em frenagem, com circulação de corrente minimizada e consequente redução de arcos e queima de fusíveis de sapata.

Nas extremidades opostas das plataformas existem "gaps" com contadores de via normalmente fechados, a serem abertos quando das desenergizações de emergência, de forma a constituir tramos neutros que impeçam o "ponteamento" de trechos adjacentes por eventual trem posicionado no respectivo "gap".

O sistema de 3º Trilho, seus equipamentos de manobra, cabos de alimentação e demais circuitos, são protegidos por sistemas utilizados em linhas metroviárias. Essa proteção é perfeitamente coordenada, por um lado com as proteções internas dos

trens, e por outro lado com todas as proteções de 22 kV da Retificadora e/ou da rede de distribuição.

3.3 Sistema de Alimentação Elétrica do Trem

O Trem, por meio de sapatas coletoras do truque, fornece alimentação aos Sistemas de Tração e Frenagem. No Suprimento Elétrico também há um inversor, sendo sua função básica converter a energia de 750 Vcc em Tensão alternada de 380 Vca, passando depois por um transformador de isolamento que rebaixa a tensão para 220Vca. Esta tensão é utilizada pelos sistemas auxiliares descritos na figura 9 a seguir.

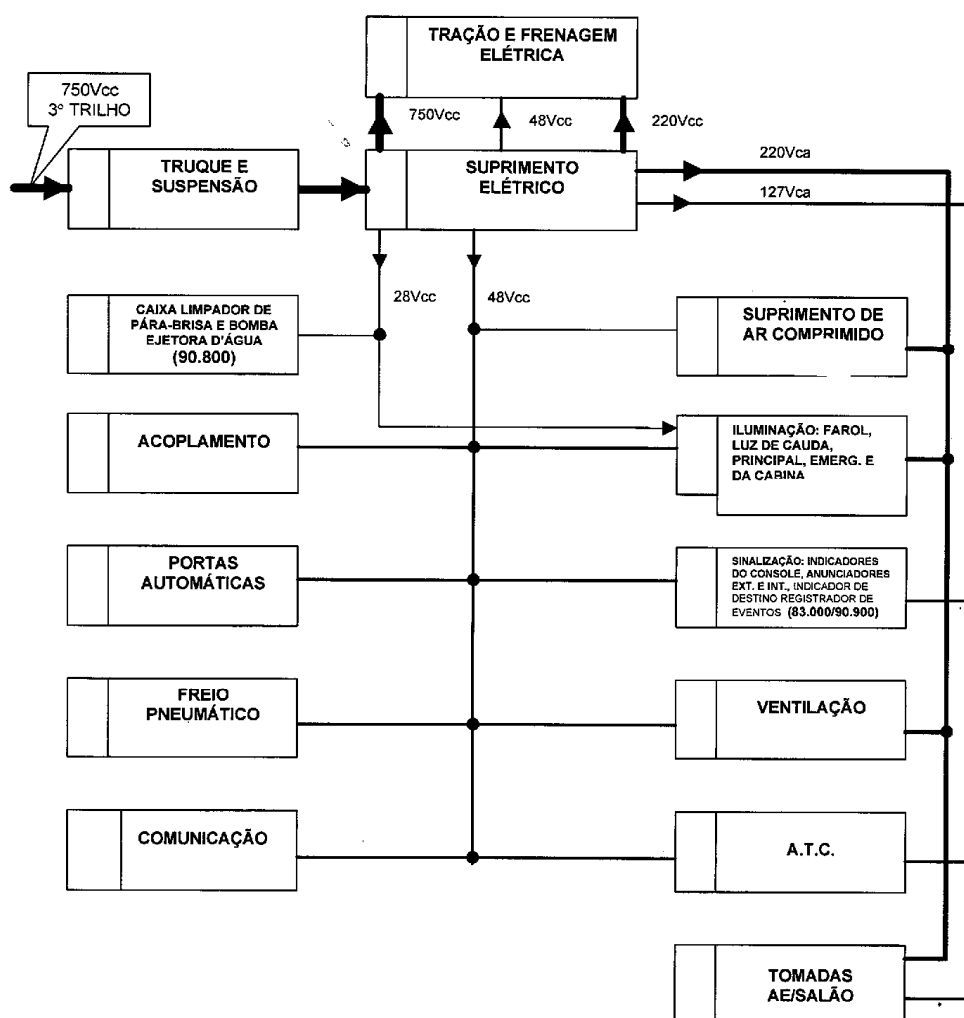


Figura 9 – Distribuição da alimentação aos Sistemas do trem

3.4 Sistema de Tração e Frenagem do Trem

O sistema de tração e frenagem elétrica é responsável pela comutação da tensão de 750 Vcc e controle da corrente dos motores de tração, permitindo a partida, aceleração e frenagem do trem, de forma automática e controlada, obedecendo as solicitações do controle da cabina solicitadas pelo operador.

Os equipamentos de propulsão estão montados em todos os carros, sendo responsáveis pela interceptação, correção e execução das solicitações de aceleração ou frenagem. Entre os equipamentos existentes, a Caixa de Controle dos Motores contém os dispositivos necessários para a operação do sistema de controle de propulsão e frenagem.

Existem 2 motores por truque, um para cada eixo. Recebem o comando elétrico das caixas de lógica, transformando-o em esforço trativo para os eixos, proporcionando a movimentação das rodas. Os motores série, de quatro polos, auto ventilados, são projetados para trabalhar dois em série em uma linha de 750 Vcc.

Caso o operador solicite freio, a lógica de propulsão faz com que a corrente dos motores caia, desligando o “chopper” e mudando as conexões do motor para a configuração freio. Se o sistema de freio pneumático percebe que as rodas estão patinando ou deslizando, fornece um sinal para a lógica de propulsão, onde a corrente dos motores é então reduzida pelo “chopper”. Quando a condição for corrigida, a corrente é retomada ao normal.

Além do Sistema de Tração o trem possui um Sistema Elétrico, composto por um inversor, sendo sua função básica converter a energia de 750 Vcc em tensão alternada de 380 Vca, passando depois por um transformador de isolamento que rebaixa a tensão para 220Vca. Esta tensão é utilizada pelos seguintes sistemas:

- Sistema de Iluminação;
- Sistema de Ventilação;
- Sistema de Radiocomunicação;
- Sistema ATC.

Quando o trem estiver parado, e sem solicitação de tração, estes sistemas manterão a corrente mínima de retorno pelos trilhos de rolamento.

4 SISTEMA ATC DO TREM

Do sistema ATC [10], as antenas servem como interface entre o equipamento ATC do trem e o equipamento ATO/ATP localizado nas estações e ao longo da via.

As antenas de identificação, parada programada e sinal de via são instaladas nos carros extremos do trem, dispostas simetricamente à esquerda e à direita, sendo:

- 2 antenas transmissoras de identificação (ID/TX);
- 2 antenas receptoras de identificação (ID/RX);
- 2 antenas de parada programada e portas (PP);
- 2 antenas de sinal de via (SV).

As antenas de sinal de via (SV) captam, através de acoplamento magnético, os sinais de corrente da Sinalização da via e os enviam ao ATC do trem. Estes sinais são utilizados para controlar qual a velocidade máxima permitida ao trem no trecho em que se encontra.

Existem duas antenas de sinal de via nas cabeceiras do trem. Elas estão posicionadas à frente das rodas do primeiro truque, sendo que cada uma tem sua posição, uma a esquerda e uma a direita, que estão destacadas dentro do círculo na cor vermelha, conforme foto 1 a seguir.



Foto 1 – Localização das antenas de sinal de via no trem

Cada antena possui uma bobina de duplo enrolamento, formando dois canais A e B. O gabarito da antena em relação ao trilho é:

- Altura: 274mm
- Largura: 178mm
- Profundidade: 124mm

Características elétricas bobina A:

- Resistência: 67 ohms $\pm 10\%$
- Indutância: 30,87 mH $\pm 10\%$

Características elétricas bobina B:

- Resistência: 74 ohms $\pm 10\%$
- Indutância: 36,09 mH $\pm 10\%$

O sinal utilizado em nossos testes foi obtido derivando-se um dos canais de cada uma das antenas no módulo Pré-Amplificador conforme figura 10 a seguir.

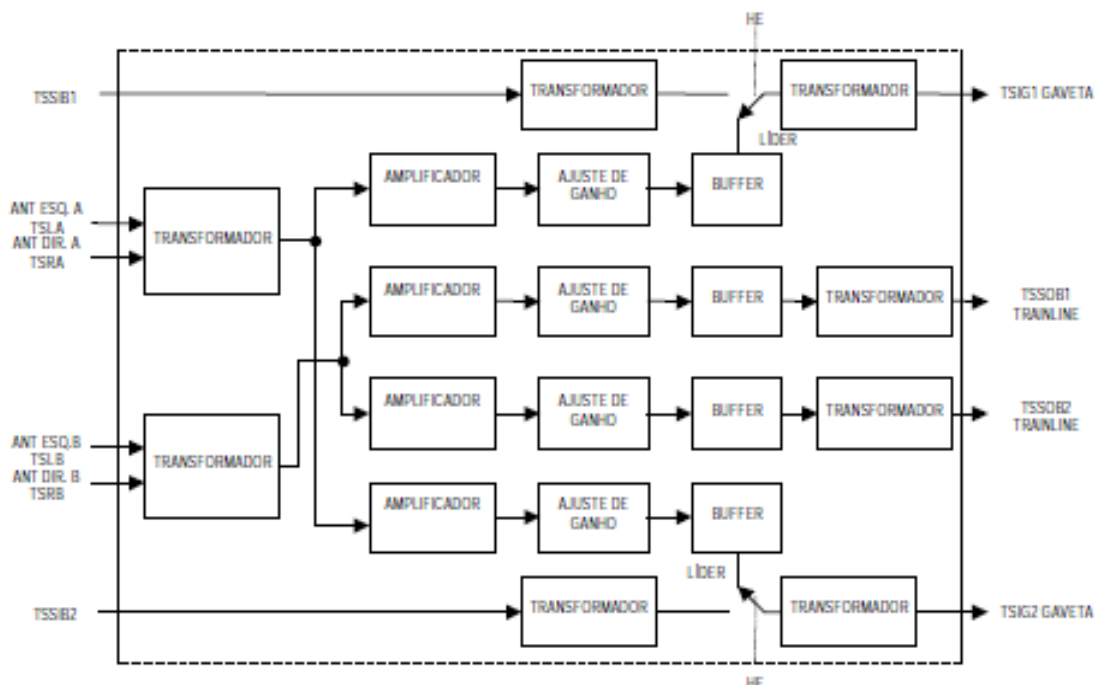


Figura 10 – Diagrama do Módulo Pré-Amplificador

5 METODOLOGIA, LOCAIS DE TESTES, CENÁRIOS TEÓRICOS E RESULTADOS

5.1 METODOLOGIA APLICADA

O trabalho iniciou-se com o estudo teórico dos sistemas elétricos e eletrônicos do trem, do Sistema de Alimentação Elétrica (tração) e o levantamento das configurações do retorno negativo em toda a malha do Metrô-SP.

Foi realizada a identificação de pontos de medição no trem para testes experimentais e posterior instrumentação e medição dos níveis de sinais de corrente de código de velocidade no ATC de bordo (entrada do Módulo Pré-Amplificador), com a monitoração em um trem Alstom da frota Milênio, utilizando as linhas de estacionamento L-12 e linha de teste L-1/88 do Pátio Jabaquara do Metrô-SP para levantamento de dados. O objetivo desta primeira abordagem foi constatar que o trem estacionado e energizado, mantém uma corrente de manutenção suficiente para gerar o campo magnético nas bobinas da antena de sinal de via.

Após a avaliação desta etapa, foi realizado um novo teste com ênfase na parte dinâmica, abrangendo a circulação do trem instrumentado com Analisadores de Espectro em trechos de via do Pátio Jabaquara e na Linha 2-Verde do Metrô-SP, com registro em corrente do sinal de 720 Hz presente na corrente de tração elétrica de retorno pelos trilhos de rolamento, abrangendo todos os cenários e configurações das vias existentes nas Linhas do Metrô-SP.

Com os dados obtidos no teste estático e dinâmico, foi realizado um estudo teórico e uma análise técnica, objetivando a consistência dos dados levantados em campo e avaliação dos resultados.

O desenvolvimento da metodologia deste trabalho é de caráter investigativo e de prova de conceitos, sem o objetivo de se desenvolver um protótipo, de forma a possibilitar futura integração com o Sistema CBTC.

5.2 LOCAIS DE TESTES

5.2.1 Pátio Jabaquara

O 1º teste experimental foi realizado na linha de estacionamento L-12 e na linha de teste L-1/88 do Pátio Jabaquara do Metrô-SP, com um Trem Alstom da Frota Milênio (T-206), conforme ilustrado na foto 2 e considerações preliminares dos registros do mapeamento a seguir.



Foto 2 – Trem em teste no Pátio do Jabaquara

5.2.1.1 Considerações preliminares dos registros do mapeamento no Pátio Jabaquara

- Todos os registros foram realizados instrumentando-se apenas uma das cabeceiras do trem, no sentido da conexão do retorno negativo, para a monitoração da corrente de tração na frequência de 720 Hz.
- Os sinais foram medidos e registrados entre a saída das antenas de sinal de via (SV) direita e esquerda e a entrada do Módulo Pré-Amplificador de Sinal de Via do ATC de Bordo.
- Os dados foram obtidos através de mapeamentos realizados com o trem nas modalidades Manual e MCS nas vias de estacionamento e teste, abrangendo

algumas das configurações de via existentes (trem parado com corrente de tração em apenas 1 trilho, via corrida, AMV em sentido normal e região de fim de via – sem bondeamento elétrico de equalização).

- d. O registro superior da tela do analisador refere-se à antena direita (vista de dentro do trem).
- e. O registro inferior da tela do analisador refere-se à antena esquerda (vista de dentro do trem).
- f. O fundo de escala de ambos os registros é de 10mV.
- g. O range de frequência registrada é de 0 a 10 KHz, sendo a frequência de 720 Hz a de interesse para nossa pesquisa. As raias apresentadas nos registros, entre 5 a 10 KHz, referem-se às frequências dos circuitos de via.

5.2.2 Via Principal

O teste na via principal da Linha 2 – Verde, foi realizado no trecho compreendido entre as estações Vila Madalena e Clínicas, com um Trem Alstom da Frota Milênio (T-206), conforme ilustrado na foto 3 e considerações preliminares dos registros do mapeamento a seguir.



Foto 3 – Trem em teste na via principal

5.2.2.1 Considerações dos registros do mapeamento na linha comercial

- a. Todos os registros foram realizados instrumentando-se apenas uma das cabeceiras do trem.
- b. Os dados foram obtidos através de mapeamentos realizados com o trem nas modalidades ATO e MCS no trecho compreendido entre as estações Clínicas e fim de via de Vila Madalena abrangendo todas as configurações de via existentes (via corrida, conexão de retorno negativo, AMV em sentido normal e reverso e região de fim de via – com e sem bondeamento elétrico de equalização).
- c. O registro superior da tela do analisador refere-se à antena direita (vista de dentro do trem);
- d. O registro inferior da tela do analisador refere-se à antena esquerda (vista de dentro do trem);
- e. O fundo de escala de ambos os registros é de 5 mV;
- f. O range de frequência registrada é de 0 a 10 KHz, sendo a frequência de 720 Hz a de interesse para nossa pesquisa. As raias apresentadas nos registros, entre 5 a 10 KHz, referem-se às frequências dos circuitos de via;

5.3 APRESENTAÇÃO DOS CENÁRIOS TEÓRICOS, CENÁRIOS PRÁTICOS E RESULTADOS

Neste item são apresentados todos os cenários teóricos, práticos e resultados sobre as configurações das vias existentes nas Linhas do Metrô-SP, que constituem a base do desenvolvimento do estudo.

A figura 11 a seguir ilustra uma visão geral dos cenários teóricos.

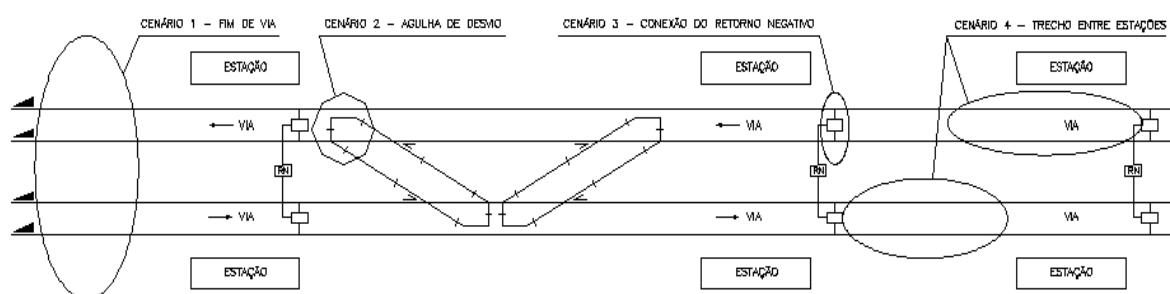


Figura 11 – Visão geral dos cenários da via

5.3.1 Cenário 1 - Região de fim de via

5.3.1.1 Análise Teórica

O trem em sentido ao fim de via (ilustrado na figura 12) com a conexão do retorno negativo atrás e sem bondeamento elétrico à frente, o sentido da corrente de tração elétrica no trilho circulam no sentido da conexão do retorno negativo, de modo a termos corrente passando apenas pelas antenas traseiras. Nesta situação, a detecção da corrente é realizada pelas antenas traseiras. Com o trem em sentido contrário ao fim de via, a detecção da corrente passa a ser pelas antenas dianteiras.

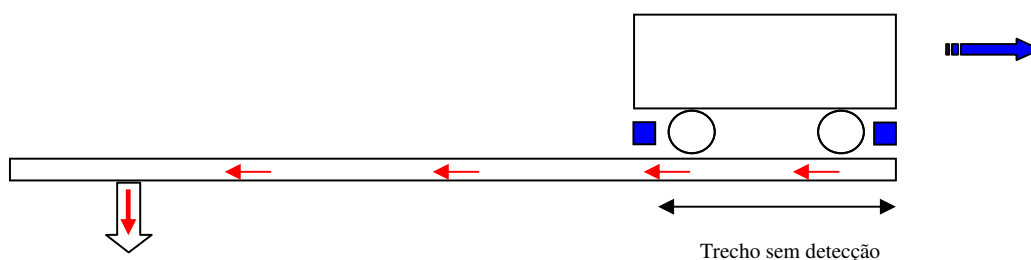


Figura 12 – Região de fim de via

Consequências:

- 1) Com o trem em sentido fim da via, após a passagem da conexão do retorno negativo, a detecção será alarmada após a passagem do trem, colocando este em

condição de risco. Com o trem saindo do fim da via em sentido do retorno negativo, a detecção será normal pelas antenas dianteiras.

2) O trilho não é detectável do último rodeiro até o fim da via, após o trem parar.

5.2.1.2 Resultado Prático

Com o trem em movimento na região de fim de linha, sem bondeamento elétrico de equalização a frente e com corrente pelos 2 trilhos em sentido oposto à cabine instrumentada, observa-se ausência de sinal nos trilhos, conforme registro realizado no Pátio Jabaquara e apresentado na foto 4 a seguir.

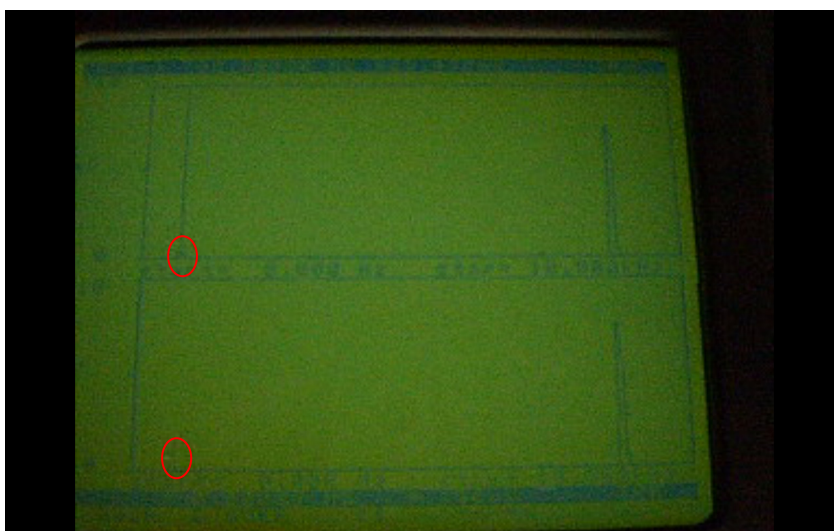


Foto 4 – Trem em movimento na região de fim de linha

Posteriormente, outro teste foi realizado com a instalação de um bondeamento elétrico entre vias no final da via, onde observou-se a presença de sinais de 720 Hz em ambas as antenas, conforme registro realizado na via comercial e apresentado na foto 5 a seguir.

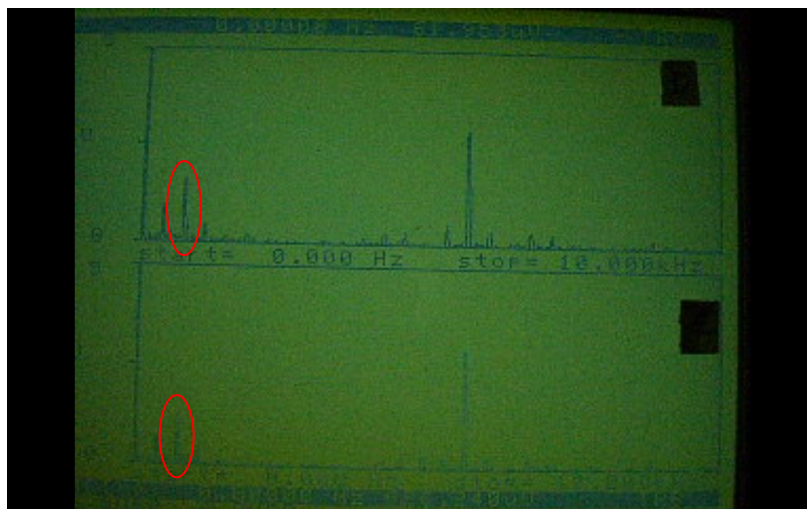


Foto 5 – Trem no fim de via com bondeamento elétrico de equalização à frente

5.3.2 Cenário 2 – Passagem do trem sobre a região de AMV

5.3.2.1 Análise Teórica

A região de AMV foi considerada crítica quanto à presença simultânea de corrente de tração elétrica de retorno pelos 2 trilhos, devido a região da ponta de agulha não ter continuidade elétrica e na região do jacaré, a continuidade elétrica é garantida por cabos, não havendo circulação da corrente pela alma do trilho. A figura 13 a seguir ilustra uma região de desvio (AMV).

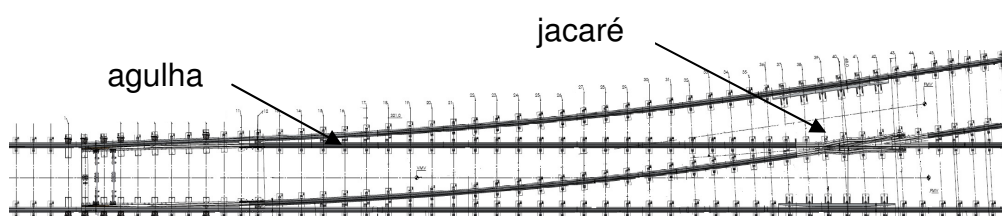


Figura 13 – Região de Desvio (AMV)

5.3.2.2 Resultado Prático

a) AMV em rota normal: Com o trem em movimento durante passagem pela região do AMV em rota normal, observa-se ausência de sinal de 720 Hz na antena oposta ao trilho contínuo (trilho externo ao desvio), conforme apresentado na foto 6 a seguir.

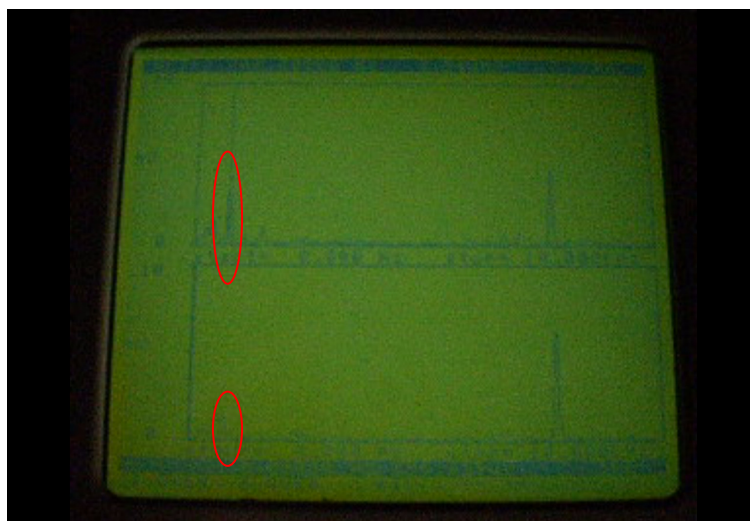


Foto 6 – Trem em movimento pela região do AMV em rota normal

b) AMV em rota reversa entre a ponta de agulha e o jacaré: Com o trem em movimento durante passagem pela entrada na região do AMV em rota reversa em desvio à esquerda, no trecho entre a ponta de agulha e o jacaré, observa-se o desbalanceamento momentâneo de sinal de 720 Hz entre antenas, conforme apresentado na foto 7 a seguir.

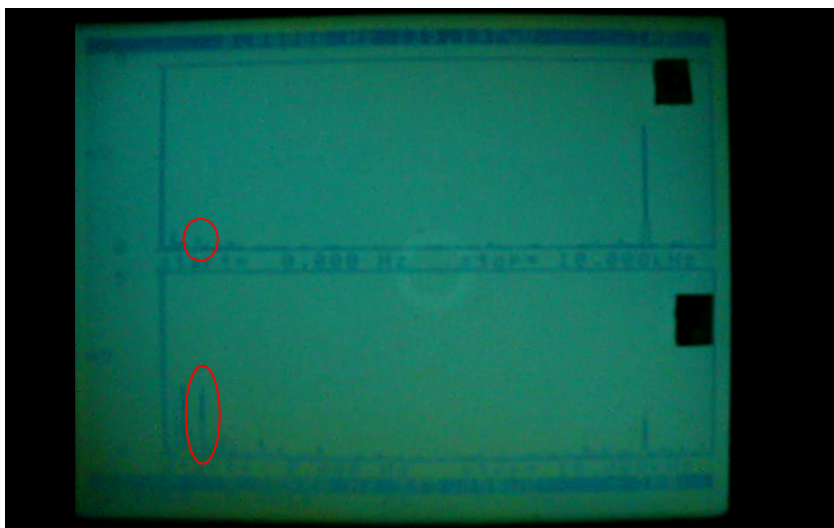
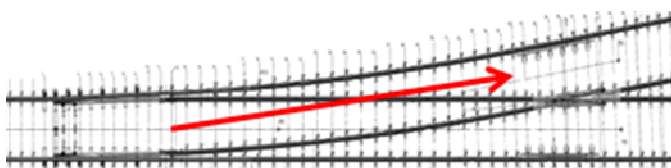


Foto 7 – Trem na região do AMV em rota reversa entre ponta de agulha e jacaré

c) AMV em rota reversa entre o jacaré e a ponta de agulha: Com o trem em movimento durante passagem pela saída da região do AMV em rota reversa em desvio à esquerda, no trecho entre o jacaré e a ponta de agulha, observa-se ausência momentânea de sinal de 720 Hz em ambas as antenas, conforme apresentado na foto 8 a seguir.

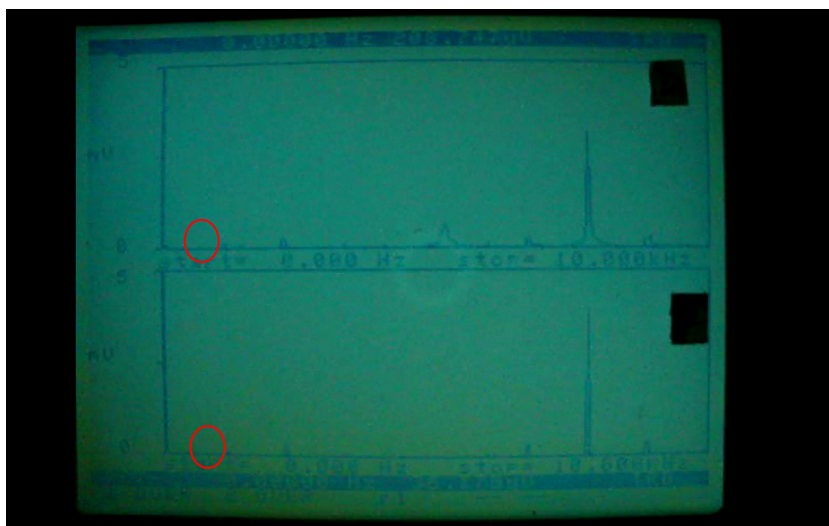
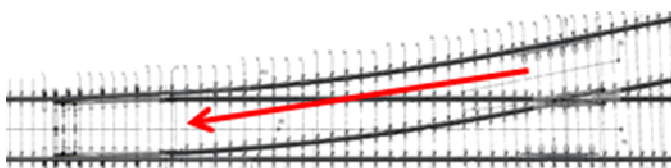


Foto 8 – Trem na região do AMV em rota reversa entre jacaré e ponta de agulha

5.3.3 Cenário 3 - Região da conexão do Retorno Negativo

5.3.3.1 Análise Teórica

Existem 3 situações distintas:

a) Trem antes da conexão do retorno negativo: Com o trem antes da conexão do retorno negativo (figura 14), o sentido da corrente de tração elétrica no trilho circula no sentido da conexão do retorno negativo, de modo a termos corrente passando apenas pelas antenas frontais. Neste caso, não há detecção de corrente nas antenas traseiras, havendo a detecção pelas antenas dianteiras.

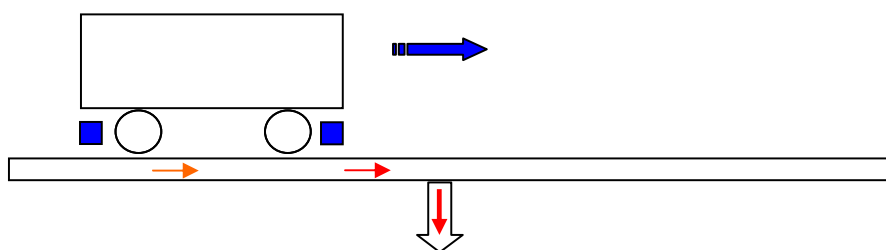


Figura 14 – Trem próximo a conexão do retorno negativo

b) Trem sobre a conexão do retorno negativo: Com o trem sobre a conexão do retorno negativo (figura 15), a corrente de tração elétrica no trilho circula no sentido interno ao trem. Neste caso, não há corrente nas antenas traseiras e dianteiras, não havendo a detecção em ambas as antenas.

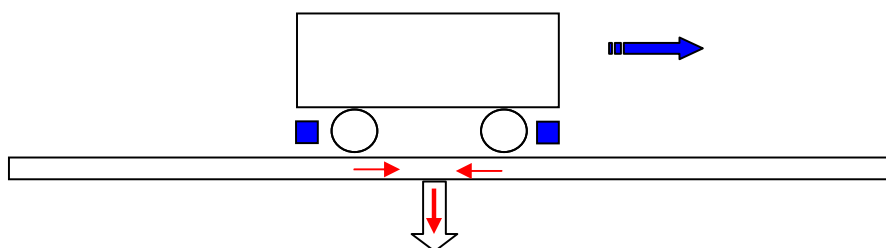


Figura 15 – Trem dentro da conexão do retorno negativo

c) Trem após a conexão do retorno negativo: Com o trem após a conexão do retorno negativo (figura 16), a corrente de tração elétrica no trilho circula no sentido traseiro ao trem, havendo corrente apenas nas antenas traseiras. Nesta situação, há a detecção pelas antenas traseiras.

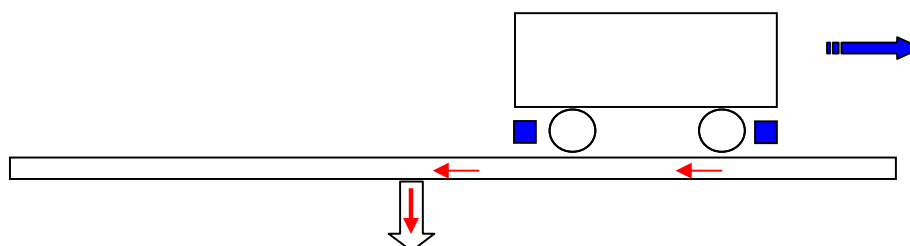


Figura 16 – Trem após a conexão do retorno negativo

Conseqüência: o trilho é sempre detectável, porém há um trecho, do comprimento do trem, onde não há leitura de corrente pelas antenas dianteiras e traseiras.

5.3.3.2 Resultado Prático

a) Trem antes da conexão do retorno negativo: Com o trem em movimento antes da passagem pela conexão do retorno negativo e com tração elétrica pelos 2 trilhos, observa-se sinal de 720 Hz em ambas as antenas dianteiras, conforme apresentado na foto 9 a seguir.

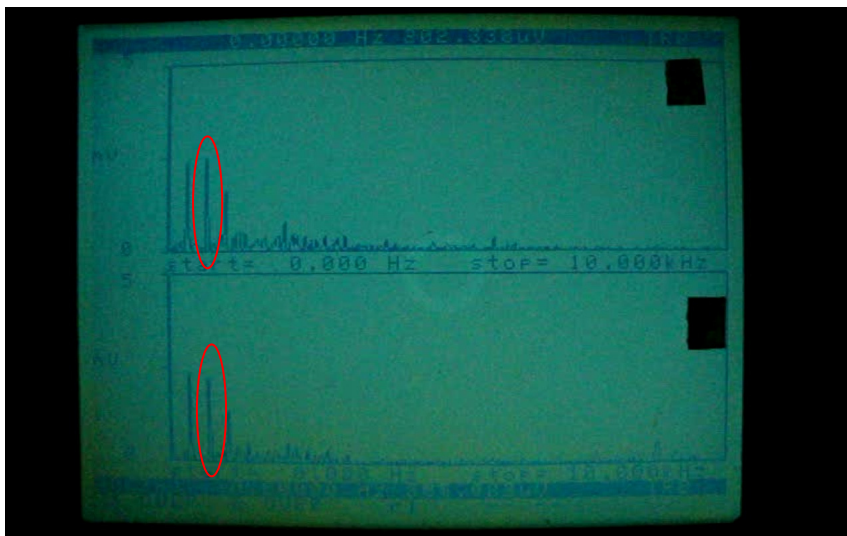


Foto 9 – Trem em movimento antes da passagem pela conexão do retorno negativo

b) Trem sobre a conexão do retorno negativo: Com o trem em movimento sobre a conexão do retorno negativo e com tração elétrica pelos 2 trilhos, observa-se ausência simultânea de sinal de 720 Hz em ambas as antenas, nos 2 trilhos de tração, conforme apresentado na foto 10 a seguir.

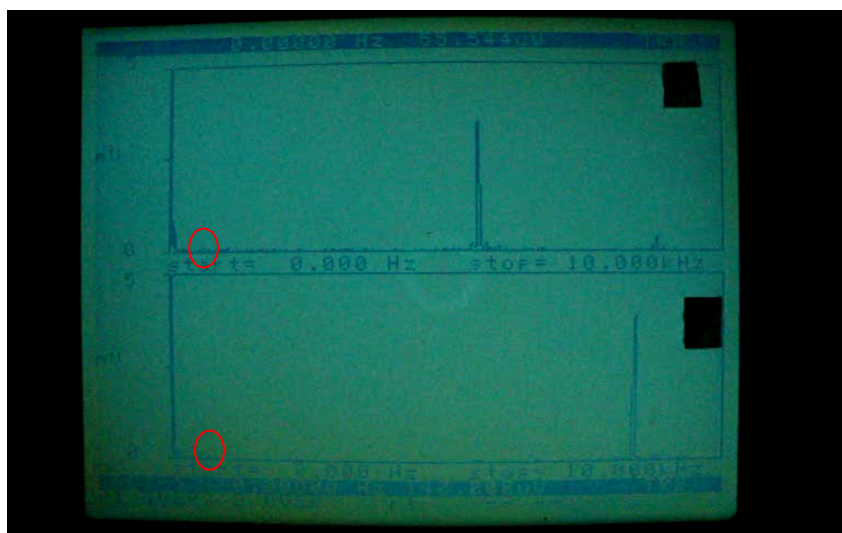


Foto 10 – Trem em movimento sobre a conexão do retorno negativo

c) Trem após a conexão do retorno negativo: Com o trem em movimento após a passagem pela conexão do retorno negativo e com tração elétrica pelos 2 trilhos, observa-se sinal de 720 Hz em ambas as antenas, nos 2 trilhos de tração, conforme apresentado na foto 11 a seguir.

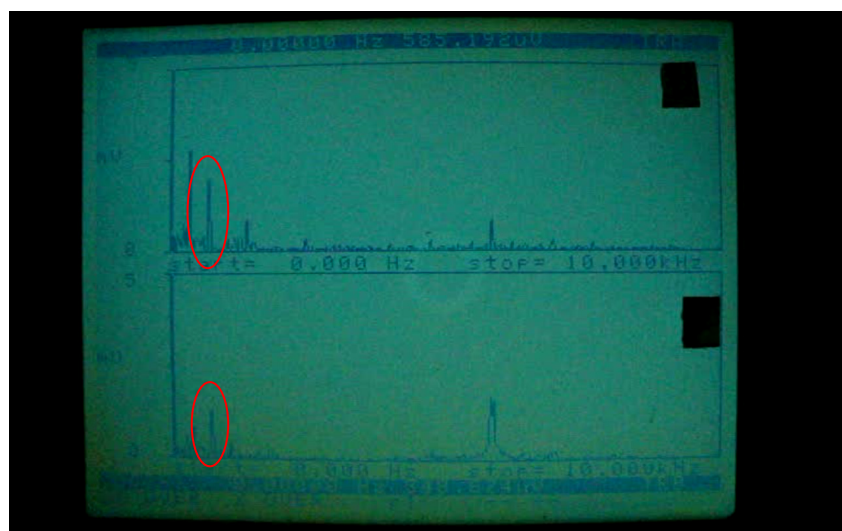


Foto 11 – Trem em movimento após a passagem pela conexão do retorno negativo

5.3.4 Cenário 4 - Região entre conexões do retorno negativo

5.3.4.1 Análise Teórica

Com o após a conexão do retorno negativo, o sentido da corrente de tração elétrica no trilho circula no sentido traseiro ao trem, havendo corrente apenas nas antenas traseiras. Nesta situação, há a detecção apenas pelas antenas traseiras. Este cenário tende a ocorrer até a posição do trem na via onde a corrente começa a circular sentido do retorno negativo à frente (ilustrado nas figuras 17, 18 e 19), quando as antenas dianteiras começam a detectar a corrente pelos trilhos.

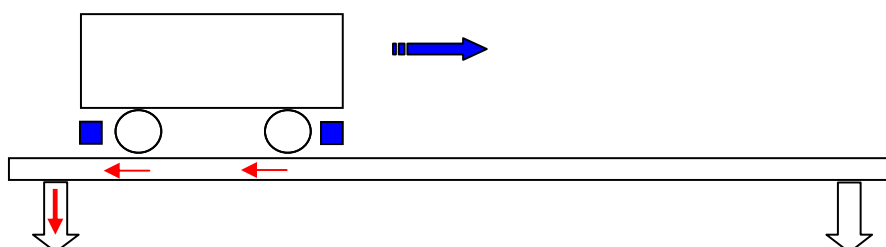


Figura 17 – Trem em movimento após a conexão do retorno negativo

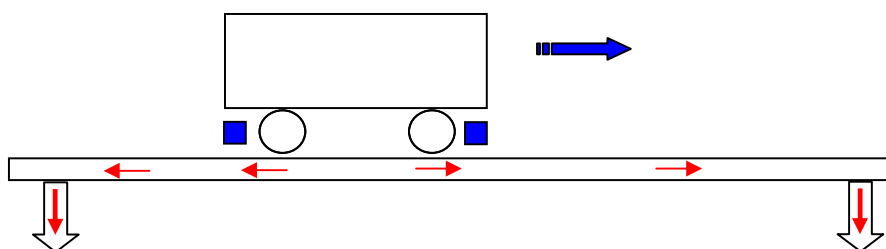


Figura 18 – Trem em movimento entre as conexões do retorno negativo

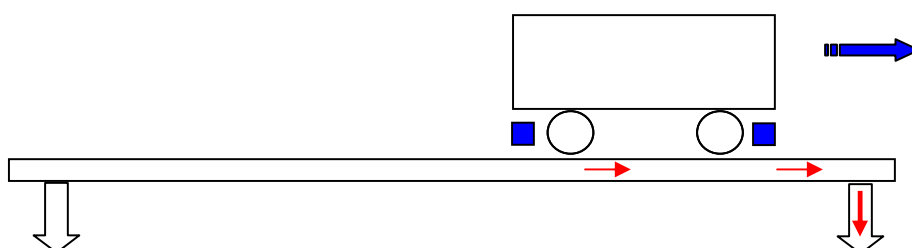


Figura 19 – Trem em movimento próximo ao retorno negativo

Conseqüência: o trilho é sempre detectável, porém pelas antenas traseiras até começar a circular corrente pelos trilhos em sentido ao retorno negativo à frente. No trecho após a conexão do retorno negativo até o momento em que a corrente começa a circular sentido do retorno negativo à frente, a detecção é possível apenas pela cabeceira traseira.

5.3.4.2 Resultado Prático

Com o trem em movimento em trecho entre conexões de retorno negativo e com tração elétrica pelos 2 trilhos, observa-se presença de sinal de 720 Hz em ambas as antenas dianteiras, logo após a passagem pelo retorno negativo até à conexão do retorno negativo seguinte, conforme apresentado na foto 12 a seguir.

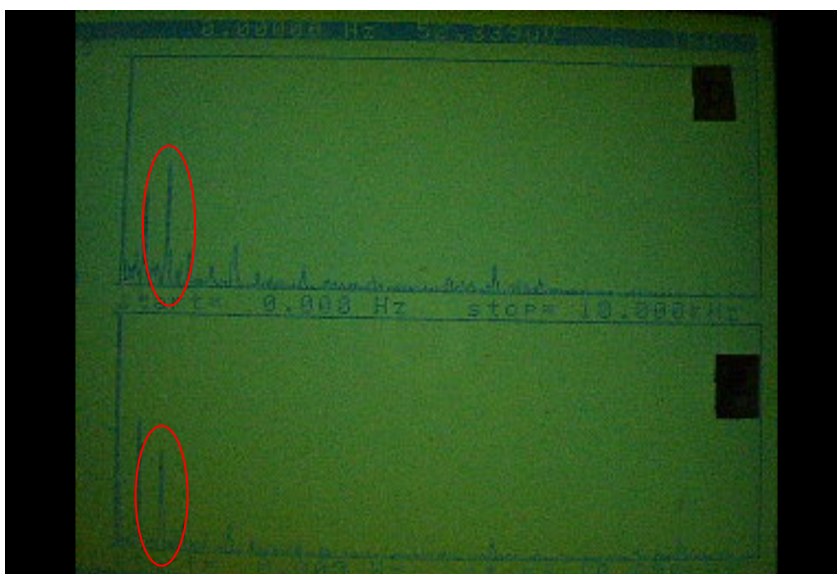


Foto 12 – Trem em movimento entre conexões de retorno negativo

5.3.5 Cenários Práticos Avaliados e Resultados

a) Simulação ideal de detecção de trilho partido: Com o trem parado na linha de estacionamento L-12 do Pátio Jabaquara, com uma junta isolante à frente do trem em um dos trilhos, há circulação de corrente de tração apenas no outro trilho de rolamento. Nesta condição, observa-se sinal de 720 Hz apenas na

antena cujo trilho é de tração. Este cenário representa uma condição ideal para a simulação de trilho partido, conforme ilustrado na foto 13 a seguir.

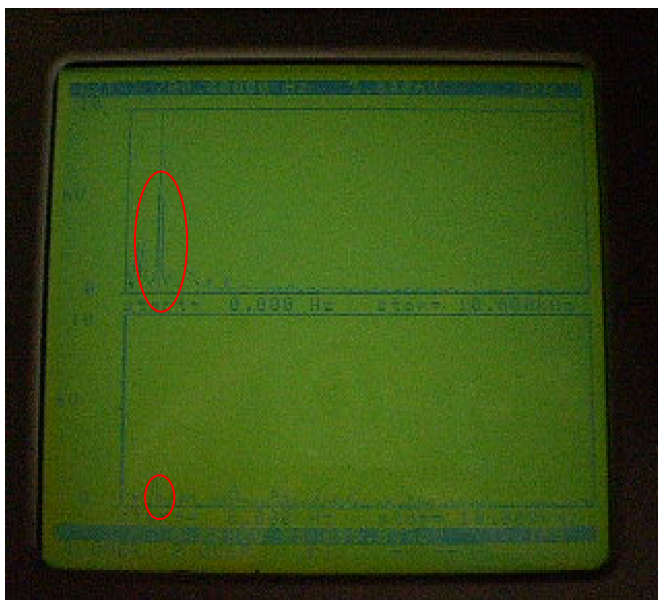


Foto 13 – Sinal de 720 Hz apenas no trilho com retorno de tração

b) Trem energizado e parado: Com o trem energizado e parado em uma plataforma, com portas abertas e com tração elétrica pelos 2 trilhos, observa-se sinal de 720 Hz simultâneo nas antenas, conforme apresentado na foto 14 a seguir.

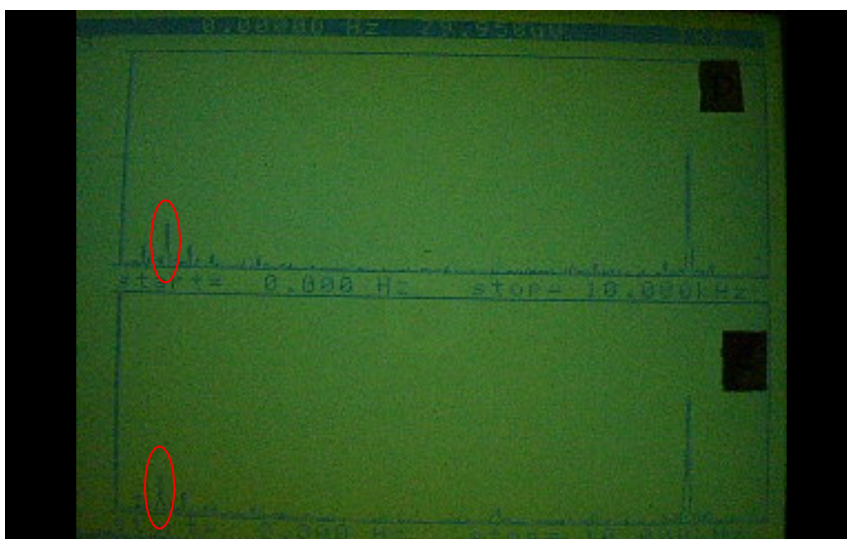


Foto 14 – Trem energizado e parado na plataforma da via

c) Trem em processo de aceleração: Com o trem em processo de aceleração, observa-se sinal de 720 Hz simultâneo nas antenas, conforme apresentado na foto 15 a seguir.

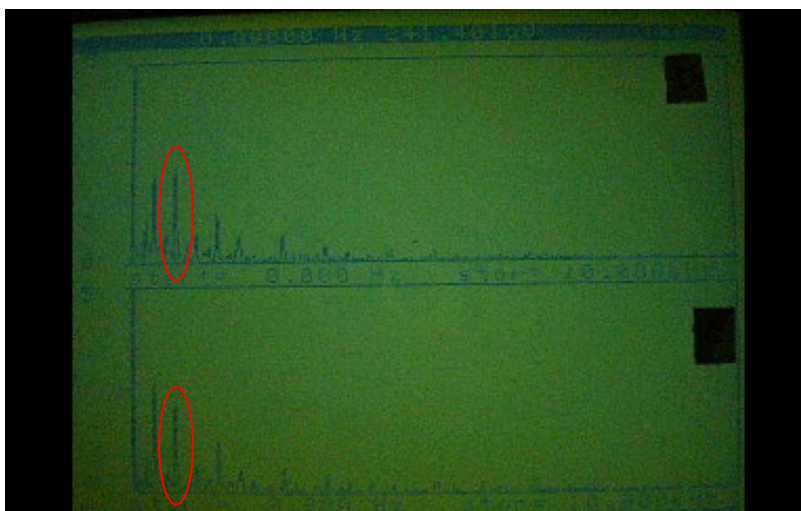


Foto 15 – Trem em processo de aceleração

d) Trem em processo de frenagem: Com o trem em processo de frenagem, observa-se ausência de sinal de 720 Hz em ambas as antenas, conforme apresentado na foto 16 a seguir.

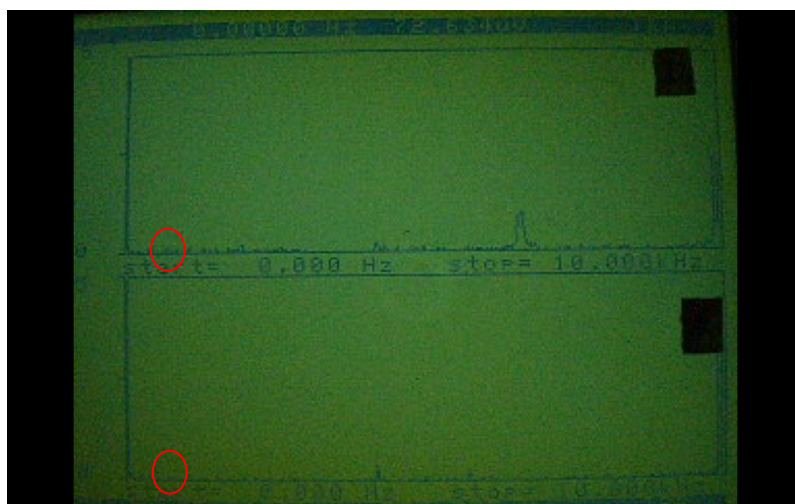


Foto 16 – Trem em processo de frenagem

e) Trem na condição de coasting: Com o trem em movimento em grade negativo (descida), ocorre a condição de coasting (sem tração e sem frenagem), devido o operador do trem, na modalidade MCS, posiciona a manete na posição neutro. Neste cenário, observa-se a diminuição do nível de sinal nas antenas, com desbalanceamento e ausência de sinal de 720 Hz, conforme apresentado na foto 17 a seguir.

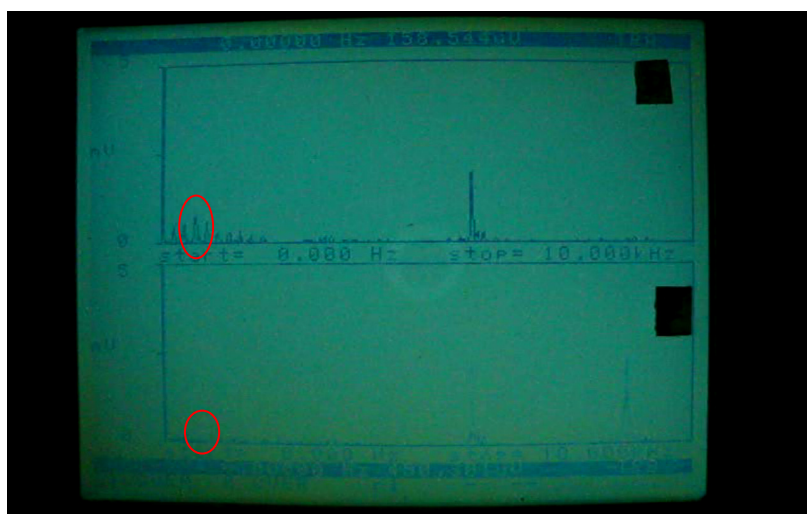


Foto 17 – Trem em descida na condição de coasting

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS E RECOMENDAÇÕES

6.1 ANÁLISE DOS CENÁRIOS VIÁVEIS E LIMITAÇÕES ENCONTRADAS

A efetividade da proposta de detecção de trilho partido foi constatada pelo desbalanceamento do sinal de 720 Hz entre as antenas. A simulação foi realizada no Pátio Jabaquara, através da configuração da via com junta isolante em apenas um trilho de rolamento e à frente do trem, conforme foto 18 a seguir.

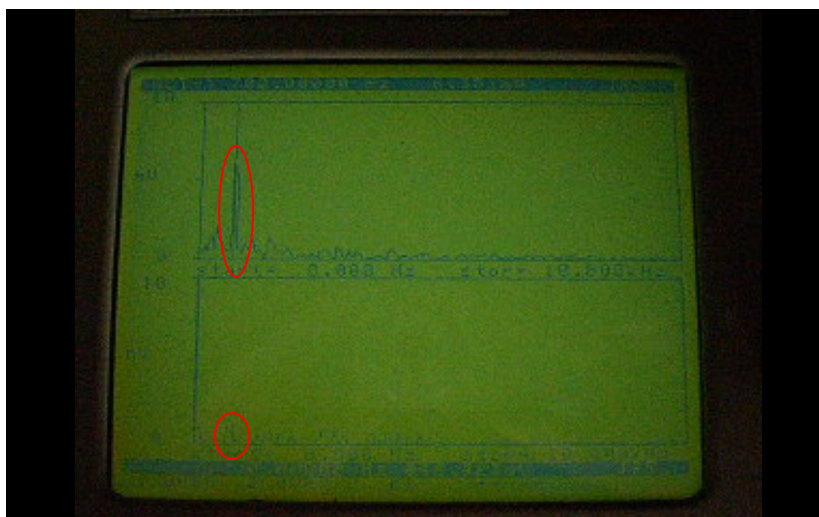


Foto 18 – Simulação ideal de trilho partido

Nos testes realizados em campo, verifica-se que não ocorre o desbalanceamento dos sinais provenientes das antenas esquerda e direita em alguns cenários, evidenciando-se a perfeita equalização da corrente de tração pelos dois trilhos de rolamento. Dessa forma, considera-se como melhor alternativa utilizar a comparação entre os sinais das antenas através dos seguintes critérios:

- a. Com corrente de tração elétrica de retorno pelos 2 trilhos de rolamento, o sinal de 720 Hz variam simultaneamente nas antenas e com a mesma

intensidade, portanto, na ocorrência de um desbalanceamento, é gerada uma indicação de trilho partido.

- b. A ausência de nível de 720 Hz em ambas as antenas não gera alarme, pois a fratura simultânea de dois trilhos em uma via e entre conexões de retorno negativo adjacentes, configura uma situação pouco provável e sem precedentes no Metrô-SP.

A seguir, são apresentados os cenários e a avaliação onde a proposta mostrou-se desfavorável.

a) Trem sobre a conexão do retorno negativo: Com o trem sobre a conexão do retorno negativo, verificou-se a ausência do sinal de 720 Hz em ambas as antenas dianteiras. Neste cenário, não há a detecção do trilho partido pela cabeceira dianteira, porém, a detecção de trilho partido é possível pela cabeceira traseira, após a passagem desta pela conexão do retorno negativo aos trilhos.

b) Trem sobre a região de AMV: Pelos testes realizados, há ocorrência de desbalanceamento de sinal de 720 Hz entre antenas em determinados trechos sobre o AMV. Pela proposta deste trabalho, não é possível a detecção de trilho partido na região do AMV, sendo necessária a adoção de um sistema complementar. Para a detecção de trilho partido nesta região, alguns métodos podem ser empregados, como, por exemplo [11]:

- On-line: Circuito de Via Tradicional instalado na região do AMV, onde a existência de uma ocupação (falsa ocupação) emite um alarme ao sistema.
- Off-line : Aplicação de Técnicas de Monitoração por Ultrassonografia, onde o dispositivo de ultrassom transmite um sinal ao interior do trilho e analisa o padrão presente no sinal refletido. Diferentes padrões são associados às específicas anomalias internas, com fundamento no princípio de que estas anomalias no aço refletem diferentes energias de ultrassom, em função das suas diferentes características.

c) Trem na região de fim de via: Nesta região, a ausência de sinal de 720 Hz nas antenas de sinal de via dianteiras do trem pode ser solucionada através da instalação de um bondeamento elétrico de equalização no final da linha, tornando-se, então, em um cenário detectável.

d) Trem em processo de frenagem: Para entendimento deste cenário, é necessária a abordagem de alguns dos Sistemas que compõe o controle do trem.

d.1) Sistema Elétrico: O sistema elétrico fornece uma tensão de 750 Vcc através do 3º trilho da via. Todos os truques possuem, em ambos os lados, uma sapata coletora que capta por contato em deslizamento essa tensão do 3º trilho.

A tensão de 750 Vcc alimenta o sistema de tração, o freio dinâmico e o inversor estático do trem, conforme apresentado na figura 20 a seguir.

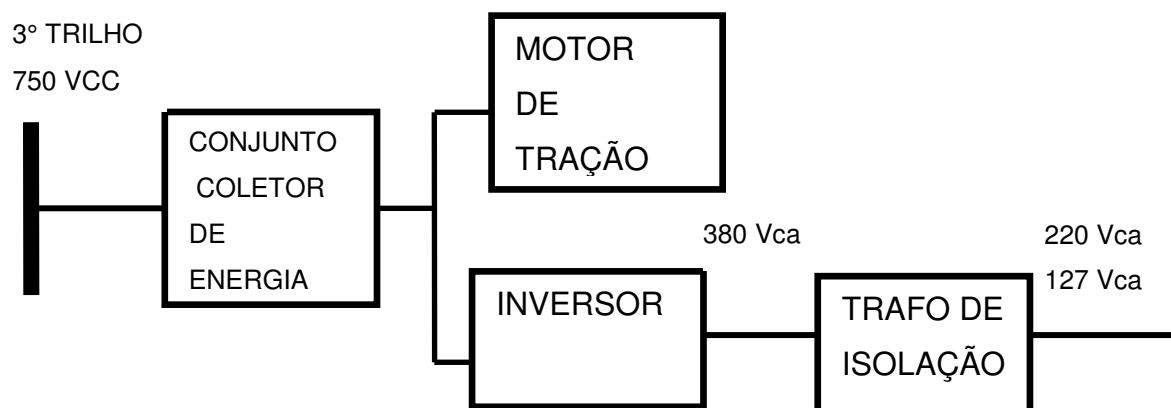


Figura 20 – Sistema de Alimentação do Trem

d.2) Sistema do Inversor Elétrico: A função básica do inversor é converter a energia de 750 Vcc em tensão alternada de 380 Vca, passando após por um transformador de isolação, que rebaixa a tensão para 220Vca.

O inversor estático alimenta algumas cargas, tais como: motores do sistema de ventilação do salão de passageiros, motores do insuflador da caixa de

semicondutores e do compressor, iluminação principal do salão de passageiros, entre outras.

O consumo destas cargas possibilita a detecção de corrente de retorno pela metodologia proposta, mesmo o trem estando sem tração.

d.3) Sistema da Lógica de Controle de Propulsão e Frenagem: Cada carro do trem controla de modo autônomo a sua taxa de propulsão e freio mediante controle externo para todos os carros. A informação para movimentar o trem é transmitida para os carros através de dois pares de “train-lines”: P e BRK.

O sinal BRK indica para cada carro se o mesmo deve operar em tração ou freio.

O sinal P quantifica a tração ou freio para cada carro. Este sinal permite ainda aplicar uma “limitação de solavanco” (jerk) para proporcionar variações suaves na taxa de aceleração e frenagem. O sinal é modificado também pelo controle de patinação e deslizamento, para minimizar os efeitos quando da ocorrência de patinação ou deslizamento. O sinal também é modificado, dependendo do peso do carro, para proporcionar maior esforço trativo quanto maior for o peso do carro.

Se o operador solicita freio ao trem, a lógica de propulsão faz com que a corrente dos motores diminua, desligando o “chopper” e mudando as conexões do motor para a configuração freio.

d.4) Motor de Tração: Quando em tração, o motor está conectado à alimentação de 750 Vcc e os sinais P e BRK proporcionam o controle da corrente que circula pelo motor e, conseqüentemente, o seu torque.

Em tração, o sistema configura os motores em série, permitindo elevado torque, o que ajuda a romper a inércia e a colocar o trem em movimento. Nessa configuração, a corrente do campo é a mesma da armadura. À medida que a velocidade aumenta, o desempenho é afetado. A fim de evitar que isso ocorra, o sistema muda a configuração dos motores, colocando os campos em paralelo, fazendo com que os motores saiam da região campo pleno para campo reduzido, possibilitando o aumento da velocidade.

Em freio, ao invés de impor uma corrente e produzir movimento, é aproveitado o movimento e a energia cinética existente para transformá-la em energia elétrica e ainda auxiliar na frenagem do trem.

Em frenagem o motor é configurado como gerador, conectando-o à linha de alimentação se a mesma estiver receptiva ou a um banco de resistores. Controlando-se a corrente proveniente do motor para a carga, controla-se a taxa de desaceleração e o efeito de frenagem.

Este freio elétrico representa a soma do freio regenerativo (que é a corrente que volta para a linha) com o freio reostático (que é a parcela desviada para bancos de resistência, quando a linha de alimentação não estiver receptiva).

O trem, ao atingir velocidade inferior a 10 km/h, inicia a aplicação de freio pneumático até o trem estiver completamente parado.

Pelo exposto, quando o sistema encontra-se em frenagem, o motor torna-se um gerador e esta energia além de retornar para a linha de alimentação, é utilizada para alimentação dos sistemas auxiliares. Nesta condição, não há consumo de corrente pelo terceiro trilho e a referência utilizada de 720 Hz não é mais encontrada.

Porém, quando a linha estiver receptiva, o motor devolve energia à linha numa faixa de frequências ampla e inferiores aos níveis aceitáveis para a frequência analisada (720 Hz).

Para solucionar este caso deve-se desenvolver estudo específico objetivando a integração entre o sistema de detecção proposto e o CBTC de modo a identificar o momento exato destas frenagens e levar em consideração a energia entregue no amplo espectro de frequências fornecido pelo motor do trem.

e) Trem em processo de Coasting: Foi constatado, nos testes realizados, que o coasting ocorre na condição de grade negativo (descida) e na modalidade MCS, enquanto que na modalidade ATO não ocorre, devido o controle da tração e frenagem ser efetuado pelo Sistema Controlador de Bordo (ATC). Neste cenário, torna-se necessária uma avaliação específica para o modo de condução MCS.

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos na proposta do trabalho, através da monitoração do sinal de 720 Hz presente na corrente de tração elétrica de retorno pelos trilhos de rolamento, utilizando-se as antenas de sinal de via do trem, mostram que o sistema de monitoração proposto apresenta níveis equalizados entre os dois trilhos nos seguintes cenários (efetividade da proposta do trabalho):

- a) Trem parado.
- b) Trem em processo de aceleração.
- c) Trem em movimento antes da passagem pela conexão do retorno negativo aos trilhos.
- d) Trem em movimento após a passagem da cabeceira traseira pela conexão do retorno negativo aos trilhos.
- e) Trem em movimento entre conexões do retorno negativo aos trilhos (entre estações).
- f) Trem em movimento na região de fim de via, considerando bondeamento elétrico de equalização no fim de via.

O estudo ainda apresenta cenários, a seguir mencionados, onde a metodologia de detecção de trilho partido empregada mostrou-se desfavorável:

- a) Passagem sobre a conexão do retorno negativo aos trilhos: a limitação refere-se a não detecção, pela cabeceira dianteira, após o ponto de conexão do retorno negativo até a passagem da cabeceira traseira do trem (comprimento típico do trem de 130 metros). Neste trecho, a detecção é possível pela cabeceira traseira após a passagem desta pela conexão do retorno negativo aos trilhos.
- b) Passagem sobre regiões de AMV: a detecção é possível com a utilização de um sistema complementar de detecção de trilho partido, tais como Circuito de Via Tradicional ou Técnicas de Ultrassonografia, por exemplo. Este cenário representa um percentual de 11% em Km ou 48 AMVs nas Linhas operacionais do Metrô-SP. Com uma integração com o Sistema CBTC, através da

configuração do mapa da via no software trem, é possível a inibição de alarmes indevidos nestas regiões.

- c) Processo de frenagem do trem: no processo de frenagem com regeneração da energia para linha, não há a monitoração do sinal em 720 Hz. Alternativamente, pode-se nestes casos, promovendo uma integração entre o sistema de detecção proposto com o CBTC, pode-se identificar o momento exato das frenagens, considerando-se o espectro de frequências da energia entregue pelo motor.
- d) Coasting: a condição de coasting ocorre na modalidade MCS, enquanto que na modalidade ATO esta não ocorre. Na Modernização do Sistema de Sinalização especificado pelo Metrô-SP, não é prevista a modalidade de condução MCS no Sistema CBTC a ser implantado.

Trabalhos Futuros

- a) Estudo para determinar a faixa de variação aceitável do desbalanceamento do sinal de 720 Hz entre as antenas de sinal de via, para que não ocorram alarmes indevidos no Sistema proposto.
- b) Estudo para detecção de trilho partido, pela cabeceira dianteira do trem, após a passagem desta pela conexão de retorno negativo aos trilhos.
- c) Estudo específico do processo de frenagem do trem, para identificar o momento exato das frenagens e o espectro de frequências da energia entregue pelo motor.
- d) Avaliação de metodologias para detecção de trilho partido na condição do trem em coasting na modalidade MCS.

REFERÊNCIAS

- [1] – SIMPÓSIO DA SECRETARIA DOS TRANSPORTES METROPOLITANOS, 2007, São Paulo. **Resumo dos trabalhos**. São Paulo: Companhia do Metropolitano de São Paulo, 2007. 1 CD-ROM.
- [2] – RAGOGNETTE, F. B. Renovação do sistema de sinalização e controle de trens da linha 1-azul do metrô-sp. In: 9º CONGRESSO NACIONAL DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL, 2002, São Paulo. 8p. 1 CD-ROM.
- [3] – CAMARGO, J. B.; ALMEIDA, J. R.; CUGNASCA, P. S. Análise preliminar de risco do sistema de sinalização cbtc. In: 12ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA, 2006, São Paulo. 17p. 1 CD-ROM.
- [4] – PALMER, S. B.; DIXON, S.; EDWARDS, R. S.; JIAN, X. **Transverse and longitudinal crack detection in the head of rail tracks using rayleigh wave-like wideband guided ultrasonic waves**. 2004. 11p. Tese (Doutorado) – University of Warwick, Dept of physics, London, 2004.
- [5] – MACEDO, F. B. **Estudo do desgaste de trilhos ferroviários**. 2009. 41p. Trabalho de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009.
- [6] – LAUERMAN, E. D. **Ferrovia e via permanente**. 2008. 58p. Trabalho de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.
- [7] – COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. **Banco de dados da gerência de manutenção do metrô-sp**: sigma e histórico de falhas e ocorrências na via permanente. São Paulo, [2000-2009]. 12p.
- [8] – ALMEIDA, C. E. P. **Concepção do sistema de alimentação elétrica e do 3º trilho do metrô-sp**. São Paulo: Companhia do Metropolitano de São Paulo, 2007. (Estudo Técnico, CS-2.81.05.XX/400-001).
- [9] – PIRES, C. L. **Simulação do sistema de tração elétrica metroferroviária**. 2006. 424p. Tese (Título de Doutor em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

- [10] – KONO, A. **Manual de manutenção do atcm-188 do trem frota milênio**. São Paulo: Alstom Brasil Energia e Transporte, 2000. (Estudo Técnico, MOM.10-011504800).
- [11] – PÓVOAS, M.; SOBOLEWSKI, M; LOPEZ, V. **Análise de soluções práticas para detecção de trilho partido**. São Paulo: Alstom Brasil Energia e Transporte, 2010. (Relatório Técnico da Engenharia, RTE.01-012036200).