

3º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

**METODOLOGIAS INOVADORAS DE DETECÇÃO, PREDIÇÃO E ANÁLISE DE  
DESVIOS FUNCIONAIS NOS COMPONENTES DE CIRCUITOS DE VIA AC.**

## INTRODUÇÃO

O desempenho do Metrô de São Paulo é um fator determinante para a fluidez do transporte urbano da metrópole. Em 2015, em média 3,8 milhões de usuários utilizaram do sistema diariamente<sup>1</sup>. A tendência é o aumento dessa média visto o crescimento contínuo da demanda de usuários que fazem uso do sistema.

Visando a melhoria contínua dos serviços prestados pela Companhia, iniciou-se um processo de modernização do sistema que contou com reforma das frotas, aquisição de novos trens substituição de equipamentos e atualização do sistema elétrico.

---

<sup>1</sup> Informações do site oficial da Companhia

Na Linha 3 - Vermelha, o aumento das correntes de propulsão dos trens novos e reformados, evidenciou desvios existentes nos equipamentos e componentes que fazem parte do sistema de sinalização e controle de tráfego de trens por bloco fixo<sup>2</sup>, em especial, os circuitos de detecção de ocupação AC 60Hz.

Visto essa característica de falha e a importância desses circuitos para o sistema de sinalização e controle de tráfego de trens, foram elaboradas metodologias inovadoras para atuação rápida, métodos de predição e análise funcional de componentes, a fim de prever potenciais falhas e desvios funcionais nestes tipos de circuitos.

## **DIAGNÓSTICO**

Os circuitos de detecção de ocupação AC 60Hz, comumente chamados de “circuitos AC”, fazem parte do sistema de proteção automática de trens (ATP) e em geral são utilizados para detecção de ocupação nas regiões de intertravamento<sup>3</sup>.

Este tipo de circuito diverge do sistema convencional de detecção de ocupação por audiofrequência (AF) que é utilizado ao longo da via, pois ao contrário deste tipo de circuito,

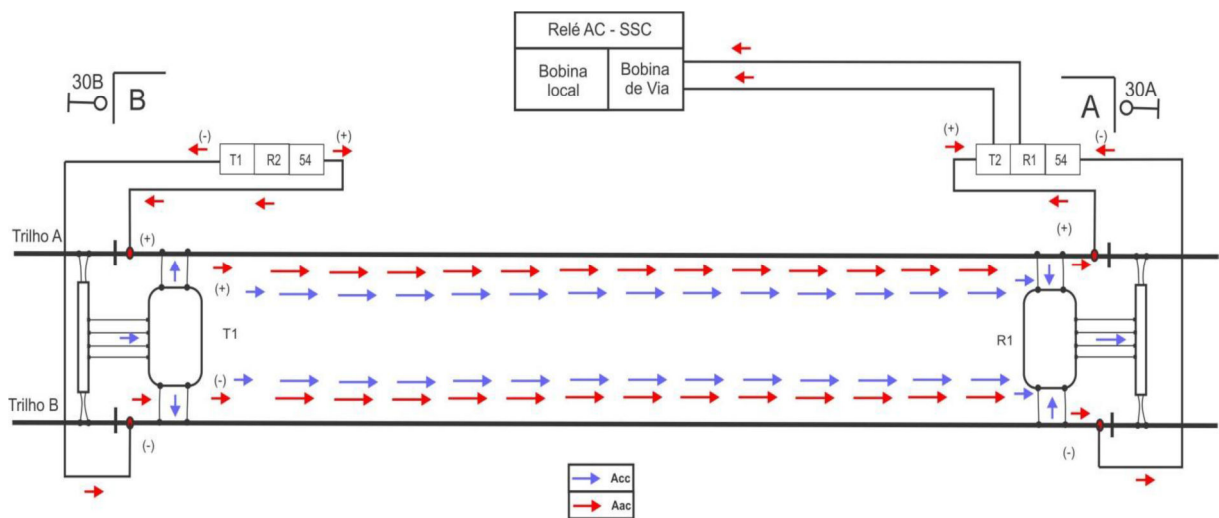
---

2 Sistema de sinalização de bloco fixo: a via é dividida em trechos de comprimento fixo denominados por "blocos fixos". Neste tipo de sinalização, os circuitos de via compõem os blocos possuem velocidade máxima permitida para cada trecho, de acordo com a localização dos circuitos em relação às estações e de acordo com as condições físicas da via (curvas, aclives ou declives).

3 Região específica do sistema de sinalização e controle, cercada por bloqueios e controle de alinhamento de rotas, destinada à manobra de trens na via com condições seguras de tráfego.

que induz um sinal de frequência nos trilhos, a tensão de ocupação em circuitos AC está diretamente conectada nos trilhos.

Os circuitos de via AC são construídos a partir do seccionamento dos trilhos num certo trecho da via, desacoplando-os eletricamente por meio de juntas isolantes. Há dois tipos de corrente elétrica que percorrem esse tipo de circuito, a saber, correntes de propulsão ou tração elétrica (DC) e a corrente de detecção (AC). Não há sobreposição de correntes DC e AC. A seguir, o diagrama de funcionamento do circuito na Figura 1:

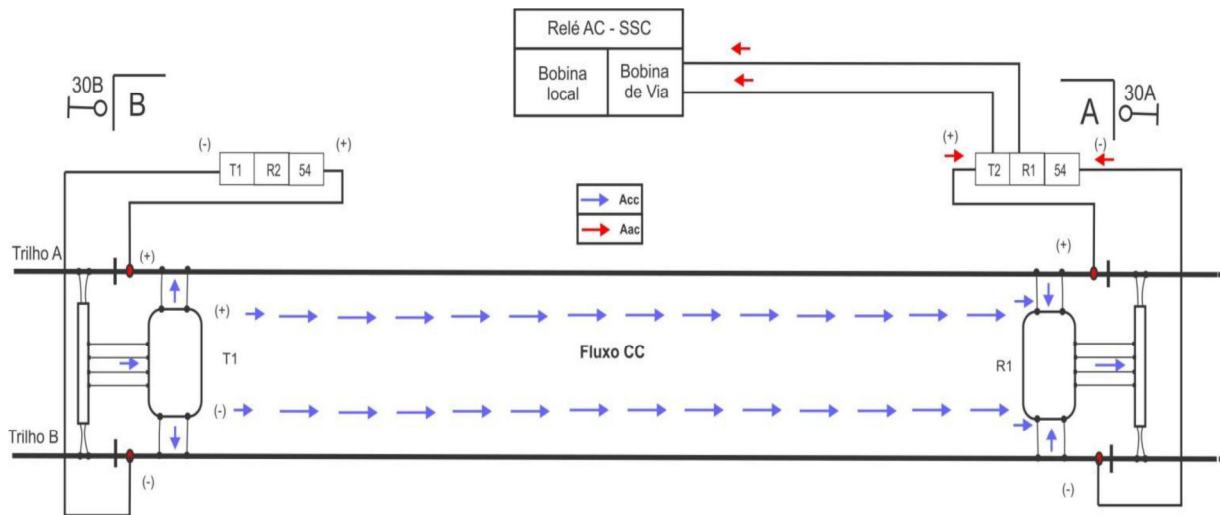


**Figura 1 – Diagrama de Funcionamento do Circuito AC**

Para melhor compreensão será realizada uma análise mediante as correntes elétricas que percorrem este tipo de circuito de detecção de ocupação. Inicialmente será explanado o comportamento do circuito AC mediante a passagem da corrente de tração/propulsão DC.

O sistema de alimentação elétrica dos trens é de 750Vcc. Analogamente a um circuito eletrônico, os trens são as cargas do circuito e a corrente de propulsão utiliza o terceiro trilho, trilhos de rolamento e cabos de equalização e retorno para “fechar” o circuito entre via e subestação retificadora. No trecho de via onde se tem os trilhos seccionados por juntas

isolantes, a continuidade do circuito para o sistema de propulsão é garantida através de impedance bonds, localizadas nas extremidades de cada circuito. Sendo assim, a corrente de tração ao entrar no circuito é dividida igualmente entre os trilhos e percorre todo o circuito. Na outra extremidade, é somada e devolvida aos circuitos contínuos. É importante manter o equilíbrio das correntes de propulsão entre os trilhos. Desbalanceamentos de corrente de propulsão afetam diretamente o sinal de detecção no circuito AC. Abaixo na Figura 2, o diagrama de funcionamento do circuito AC para a corrente de propulsão.

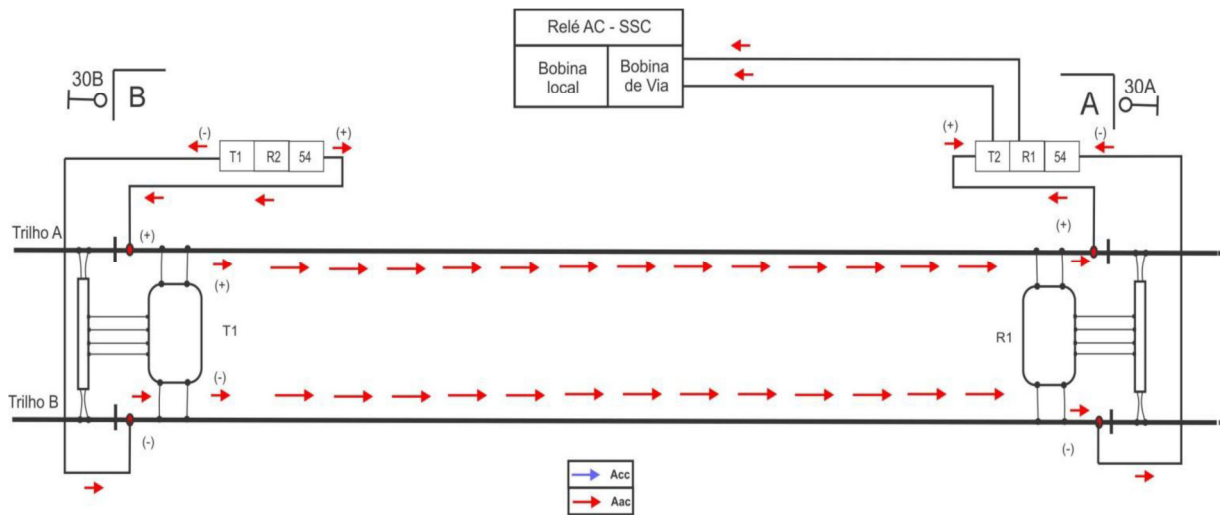


**Figura 2 – Circulação de corrente de propulsão DC no circuito**

Em caso de ocupação do trem os trilhos serão curto-circuitados, porém do ponto de vista elétrico, a passagem da corrente de propulsão não será afetada, visto que o rodeiro do trem coloca em curto circuito os trilhos com o mesmo potencial elétrico.

A corrente de propulsão é o resultado da somatória das correntes de tração de todos os trens (cargas) que estão na região das subestações retificadoras (fonte) podendo alcançar em determinados momentos até 6000A.

Do ponto de vista da corrente AC circulante no circuito, a detecção de ocupação é feita através da injeção de um sinal AC 60Hz em uma extremidade denominada TX, na outra extremidade, RX, o sinal é coletado e enviado a um relé de ocupação, conforme diagrama de representação na Figura 3:



**Figura 3 – Circulação de corrente de detecção AC no circuito**

As caixas à margem de via realizam a adequação do sinal AC recebido pela sala técnica e após passagem pelos trilhos readéquam o sinal para retorno à sala, fornecendo uma corrente de energização do relé de ocupação associado a este circuito.

Quando o trem ocupa o circuito de via AC, os trilhos são curto-circuitados, ocasionando a queda de corrente AC na extremidade RX, provocando a "desenergização" do relé vital, detectando-se a ocupação física do trem e possibilitando ao intertravamento condições seguras de tráfego.

Falhas de falsa ocupação nesses circuitos podem ser originadas por diversos fatores, entre eles, desvios funcionais das caixas de controle e circuitos da sala técnica e interferência de componentes da via permanente. Esses fatores resultam na queda indevida do relé vital de

ocupação gerando a falsa ocupação no circuito. As implicações operacionais geradas por esse tipo de falha são grandes, já que os alinhamentos de rotas nessas regiões tornam-se mais restritivos e requerem um tempo mínimo para serem efetuados. A Figura 4 apresenta um cenário de falsa ocupação.

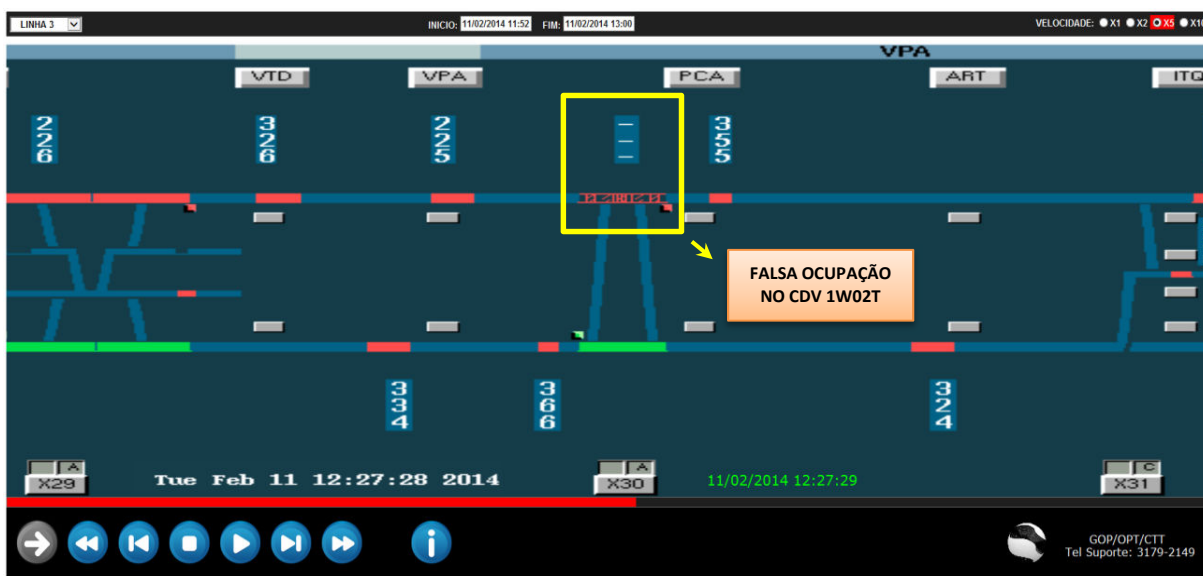


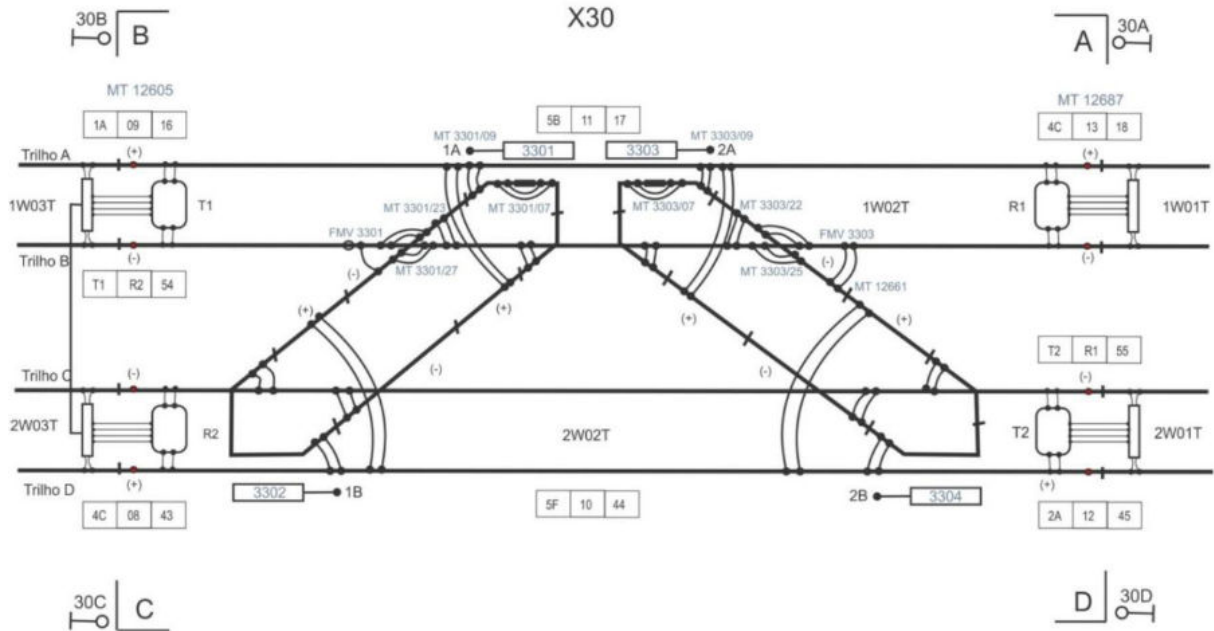
Figura 4 - Falsa ocupação no CDV 1W02T de PCA

## ESTUDO DE CASO - Falsa Ocupação Intermitente no circuito de via 1W02T de Patriarca (PCA)

A ocorrência de falsa ocupação intermitente no circuito de via (CDV) 1W02T – X30 de PCA foi base para todo o desenvolvimento dos métodos de atuação e será utilizado como estudo de caso para descrição da aplicação de alguns dos métodos de atuação elaborados.

O circuito afetado pela falsa ocupação possui uma característica específica com relação à sua topografia, já que está instalado numa região de inclinação de via, com "grade" de 4%. Esta característica somada ao aumento das correntes de tração exigidas pela entrada de novos

trens na linha potencializou a incidência da falha. A Figura 5 mostra a configuração elétrica do intertravamento X30 de PCA e os circuitos que o compõe:



**Figura 5 – Intertravamento X30 (PCA)**

A falha se apresentava de forma peculiar e diferente das falhas que até então se apresentavam nos circuitos AC e era caracterizada pela variação da corrente de detecção AC de retorno para a sala técnica e energização do relé de ocupação.

Essa variação se apresentava constantemente em torno de 10mA, porém nos casos mais críticos a variação chegava a 20mA, ocasionando a "desenergização" indevida do relé de ocupação resultando na falsa ocupação do circuito.

Após atuações das equipes de manutenção corretiva na falha não foram obtidos resultados satisfatórios nos levantamentos de desvios funcionais. Concluiu-se que os métodos de atuações convencionais não estavam sendo efetivos para a identificação de desvios e solução da falha.

Iniciou-se então um processo de monitoramento dos cenários de falha de falsa ocupação e identificou-se que o aumento de trens na região do circuito X30 potencializava a incidência de eventos de falsas ocupações. A Figura 6 mostra a concentração de trens na região do intertravamento quando da ocorrência da falsa ocupação:



**Figura 6 – Trens na região periférica do intertravamento X30**

Esse cenário mostrou a necessidade de analisar os níveis e características da corrente de tração/propulsão de trens em tempo real para identificar as interferências dos novos níveis de corrente de propulsão nos circuitos de detecção AC. Além disso, era necessário o registro dessas correntes para serem analisadas posteriormente com softwares de análise de dados e efetuar o diagnóstico da falha.

No entanto, o processo de medição de corrente de propulsão através de instrumentos de medida convencionais (alicates amperímetros DC) torna-se inviável devido à variação brusca de corrente e aos níveis alcançados por esta em momentos onde ocorre a tração ou regeneração de corrente pelos trens, com picos de corrente de até 6000A.



### Método de Aquisição de Corrente de Propulsão por diferença de potencial (DDP):

Todas as dificuldades relatadas para aquisição da corrente de propulsão circulante mostraram a necessidade de utilização de um método não invasivo e que não interferisse na circulação de trens no trecho durante o registro dessas correntes.

Além disso, a importância de uma análise gráfica da corrente de propulsão juntamente com outros sinais de controle, era imprescindível para definições de comportamento do circuito AC mediante a circulação dessa corrente e solução da falha.

O método proposto para aquisição da corrente de propulsão efetua a captura da diferença de potencial em uma seção de trilho, utilizando um registrador de alto desempenho, e em posse da resistência elétrica dessa seção, obtém-se o valor da corrente de propulsão de forma indireta, conforme diagrama na Figura 7:

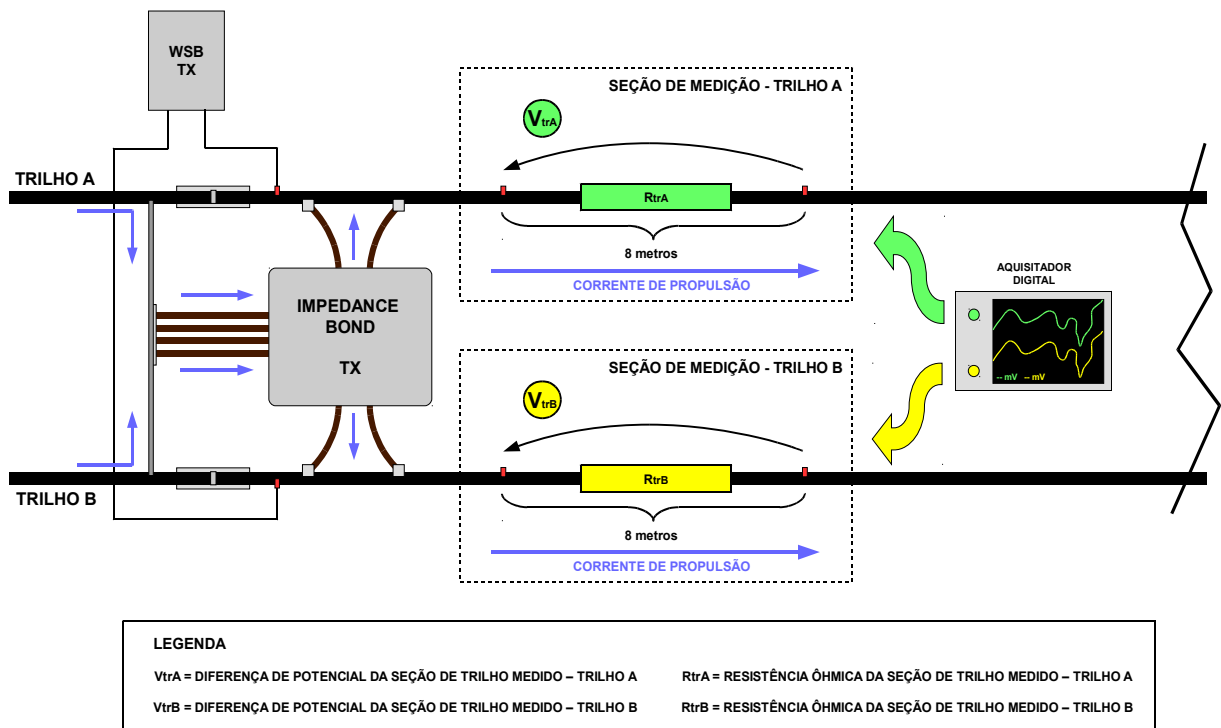


Figura 7 – Método de medição de corrente de propulsão por diferença de potencial

Obtém-se o valor da corrente de propulsão do circuito através da razão da diferença de potencial pela resistência ôhmica da seção de trilho medido, conforme equação abaixo:

$$I_{pr} = \frac{V_{tr}}{R_{tr}}$$

Onde:

- $I_{pr}$  = Corrente de propulsão circulante no circuito AC;
- $V_{tr}$  = Diferença de potencial da seção do trilho medido;
- $R_{tr}$  = Resistência ôhmica da seção do trilho medido.

#### **Processo de aferição de resistência elétrica de trilhos:**

Verificou-se, em pesquisa às normas técnicas e literaturas internacionais, que o valor de resistência elétrica previsto era de 30 a 35 $\mu\Omega$ /m de trilho. Para aferição do valor citado, foram realizados testes de resistência elétrica em oficina de uma seção de trilhos de forma direta, com micro-ohmímetro digital e de forma indireta, com de um gerador de corrente (corrente DC controlada) e voltímetro e amperímetro DC.

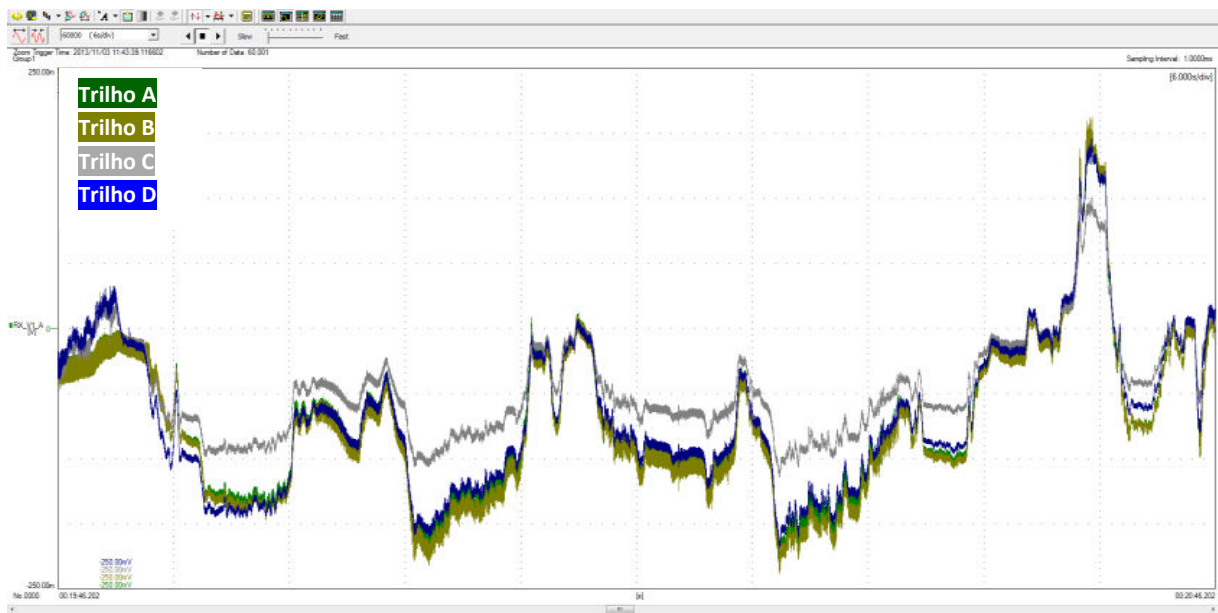
A resistência elétrica dos trilhos obtida no processo de aferição foi de 33 $\mu\Omega$ /m. Esse valor de resistência elétrica não sofre alteração mesmo em seções de trilhos com processos de soldagem alumino-térmicos.

Comprovou-se, portanto a validade do método de aferição e a similaridade do valor de resistência ôhmica de trilhos conforme normas técnicas internacionais.

### Aplicação do método:

No circuito de via 1W02T, foram instalados pontos de captura de diferença de potencial no intertravamento para monitoramento das correntes circulantes nos 4 (quatro) trilhos, A B C e D.

A Figura 8 mostra os sinais capturados e as correntes de propulsão circulantes num determinado período de tempo nas vias 1 e 2:



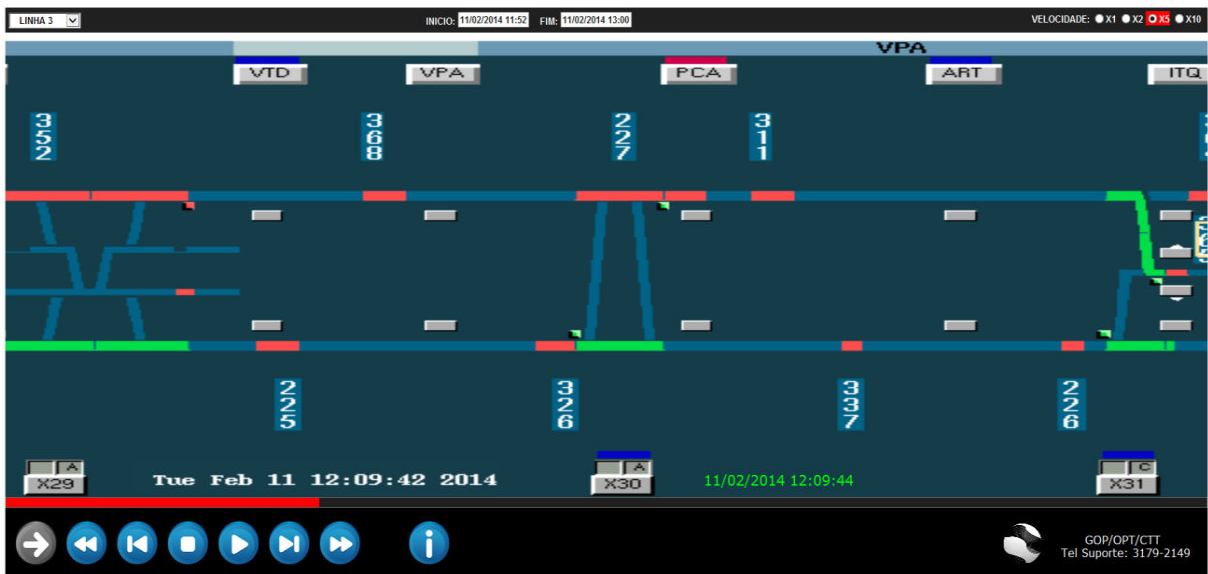
**Figura 8 - Sinais capturados de corrente de propulsão nas vias 1 e 2 do X30**

Visualmente é possível constatar que as correntes de propulsão nos trilhos A, B estavam equilibradas, ou seja, possuíam o mesmo nível de corrente, porém a corrente no trilho C apresentava um nível muito inferior, enquanto a corrente do trilho D apresentava nível semelhante às correntes dos trilhos A e B. A relação de desbalanceamento entre essas correntes, dos trilhos C e D, chegava a aproximadamente 30%.

Analisando as correntes circulantes nos circuitos, ou seja, a somatória das correntes dos trilhos A e B, e a somatória das correntes dos trilhos C e D constatou-se que os níveis de corrente de propulsão que circulavam pelo circuito da via 1 estavam muito acima que o nível de corrente do circuito da via 2.

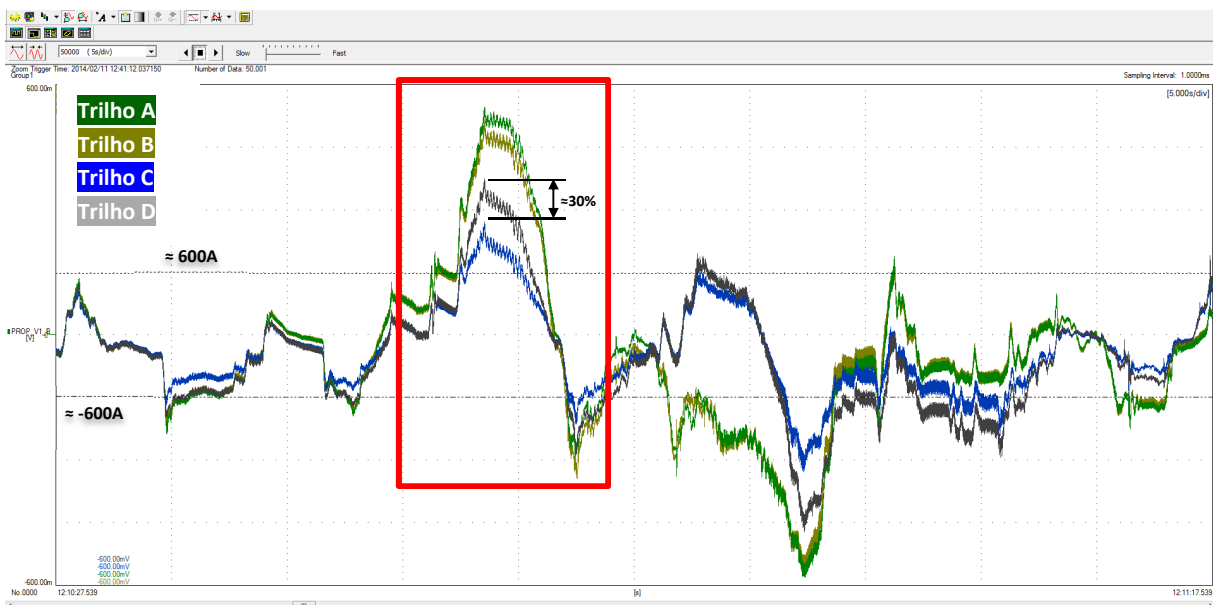
Devido ao fato dos dois circuitos encontrarem-se dispostos eletricamente em paralelo, através da ligação de "cross-bond", e possuírem características físicas e dimensão similares, estes deveriam apresentar níveis semelhantes de corrente circulantes.

Outro cenário levantado, foi o aumento abrupto da corrente na via 1 quando da aproximação do trem do intertravamento pelas vias 1 e 2, gerando a falsa ocupação, conforme Figura 9:



**Figura 9 – Trens se aproximando do intertravamento X30**

As correntes de propulsão do evento da Figura 9 foram registradas, e com auxílio do software de análise de sinais, foram obtidos os valores de corrente de propulsão, conforme Figura 10 e dados convertidos na Tabela 1:



**Figura 10 - Corrente de propulsão nas vias 1 e 2 no momento da falsa ocupação**

Na Figura 10 é possível observar as correntes de propulsão circulantes nas vias 1 e 2 e evidenciam um aumento abrupto dessa corrente no momento da falsa ocupação, conforme evento destacado.

**Tabela 1 - Dados Convertidos do evento de Falsa Ocupação**

Hora	Corrente de Propulsão (Ampère)				Outras Informações				
	Trilho A	Trilho B	Trilho C	Trilho D	Defas. A/B	Defas. C/D	$\Sigma V1$	$\Sigma V2$	$\Sigma V1 + \Sigma V2$
12:09:44	558,67	557,39	229,25	253,01	0%	9%	1116,06	482,25	1598,31
12:09:45	1509,70	1554,00	764,16	1051,20	3%	27%	3063,70	1815,36	4879,06
12:09:46	1836,55	1999,01	834,80	1250,91	8%	33%	3835,56	2085,70	5921,27
12:09:47	1537,95	1689,50	572,80	908,00	9%	37%	3227,45	1480,80	4708,25
12:09:48	794,98	866,90	218,97	290,25	8%	25%	1661,88	509,23	2171,11
12:09:49	-662,70	-615,82	-450,79	-541,97	8%	17%	-1278,52	-992,76	-2271,29
12:09:50	-825,81	-753,88	-553,53	-789,84	10%	30%	-1579,69	-1343,38	-2923,07

Analisando os dados fica claro que no momento da falsa ocupação ocorre o aumento da corrente de propulsão na via 1 com nível de corrente de mais de 3000A. Outro desvio

observado foi o desbalanceamento de corrente entre os trilhos C e D, em 30%, acima do valor máximo permitido de 12%.

Após levantamento e análise de diversos cenários, observou-se que todos os eventos de falsa ocupação tinham os mesmos efeitos desvios já levantados.

Tais desvios afetavam diretamente o funcionamento das impedance bonds da via 1, com alteração das características elétricas das mesmas, devido a um processo de saturação magnética do núcleo das bobinas. Esse processo gera um aumento de consumo de corrente de detecção AC pelas impedance bonds fazendo com que essa corrente sofra variações e nos casos mais críticos drene parte da corrente de energização do relé de ocupação do circuito gerando a falsa ocupação.

Esse cenário evidenciou um provável desvio de resistência à corrente elétrica no circuito da via 2, CDV 2W02T. Esse desvio provocava um desvio de parte da corrente de propulsão para o circuito da via 1, resultando do aumento dos níveis de corrente superiores ao parâmetro e regimes de trabalho das impedance bonds instaladas no CDV 1W02T.

Dada a situação, optou-se pela pesquisa e atuação na via 2 para sanar os problemas relacionados ao desbalanceamento de correntes entre os trilhos e circuitos das vias 1 e 2.

### **Dificuldade de medida de resistência de contato de conexões e cabos de interligação**

Iniciou-se um processo de pesquisa sobre as implicações do aumento de resistência de contato de pinos e cabos de interligação (bondeamento), que garantem a circulação das correntes de propulsão e detecção e concluiu-se que problemas relacionados a estes desvios

resultam no aumento da resistência ôhmica total do circuito, já que as resistências das conexões de cada componente ao longo desse circuito são somadas.

Em vista da importância desses componentes, surgiu a necessidade de medir e definir parâmetros de resistência de contato das conexões e pinos de interligação. No entanto, o processo de medição de resistência de contato utilizando o micro ohmímetro mostra-se ineficiente neste tipo de situação, primeiramente devido à falta de parâmetro para validação da resistência de contato (não havia um valor de resistência previsto em procedimento), também pela configuração de ligação em paralelo dos cabos e pinos, conforme Figura 11:

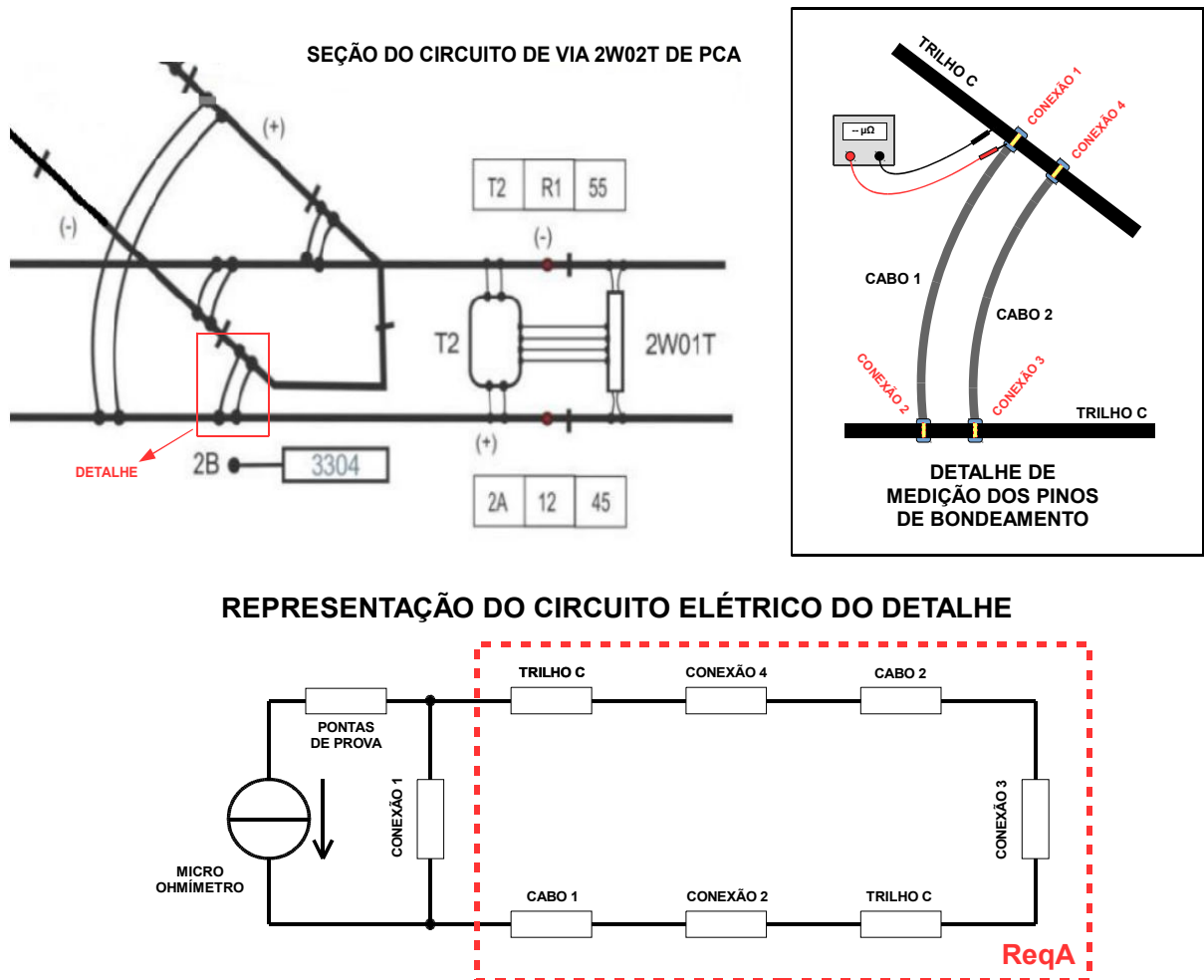


Figura 11 – Processo de medição de resistência ôhmica de conexões

Como se observa, a ligação dos cabos em paralelo impossibilita a medida, visto que, a resistência medida pelo instrumento, será a resistência equivalente da conexão medida somada a resistência da malha de conexões, trilhos e pinos conectados ( $ReqA$ ). O resultado dessa medida sempre será menor do que a menor resistência existente.

$$\frac{1}{Req} = \frac{1}{RCONEXÃO1} + \frac{1}{(ReqA)}$$

Onde:

- $Req$  = Resistência ôhmica medida pelo instrumento;
- $RCONEXÃO1$  = Resistência ôhmica da Conexão 1;
- $ReqA$  = Resistência ôhmica das conexões, trilhos e cabos de interligação em paralelo à Conexão 1.

Outra interferência no processo de medição da resistência de contato dos pinos com o micro-ohmímetro é a própria resistência da ponta de prova do equipamento. Em um ambiente de via os componentes do circuito são robustos e inviabilizam um bom contato elétrico entre as pontas de prova do instrumento, conexões e trilhos, com o aumento da resistência de contato das pontas de prova, sendo suficientes para gerar possíveis inconsistências de medida da conexão.



### Método de Medição de Pinos e Conexões por "Corrente Derivada":

As correntes de propulsão que circulam por um determinado circuito AC devem estar balanceadas, ou seja, devem ser divididas em parcelas iguais entre os trilhos do circuito. Os desbalanceamentos de corrente de propulsão no circuito AC influenciam diretamente em seu funcionamento.

Tendo em vista todas as dificuldades levantadas para medição da resistência ôhmica dos pinos e conexões no circuito AC, foi elaborado um método que descarta a necessidade de medição ôhmica das conexões e visa mensurar a quantidade de corrente, gerada a partir de uma fonte DC, que passa pela conexão medida e a corrente que deriva para as conexões em paralelo. A Figura 12 traz o diagrama de aplicação do método.

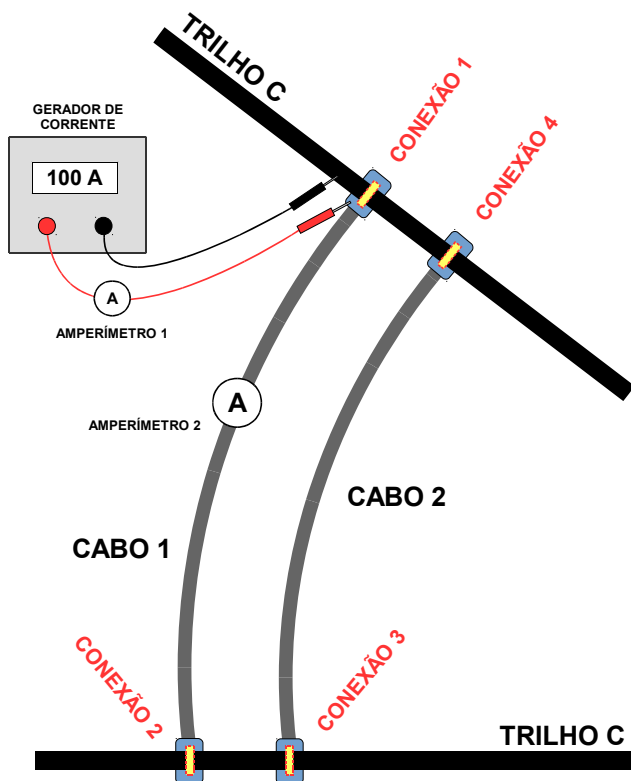
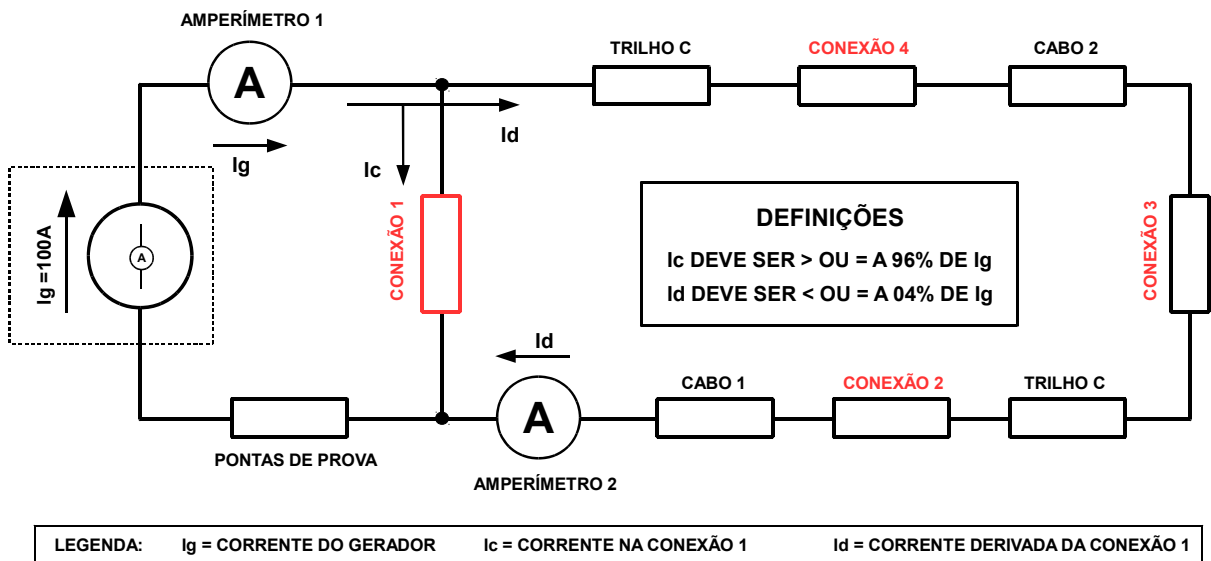


Figura 12 – Seção de via para medição de conexões

Com a utilização do método de “corrente derivada” para medição da resistência de contato da CONEXÃO 1, todas as resistências adicionais que podem interferir e inviabilizar a medida numa determinada conexão são descartadas, visto que a variável controlada é a corrente elétrica que passa pela conexão e não a resistência ôhmica da mesma. Abaixo o circuito elétrico do cenário é apresentado na Figura 13:



**Figura 13 – Processo de medição por "corrente derivada" da CONEXÃO 1**

Como se observa na Figura 13, aplicando o método de medição por “corrente derivada”, o Amperímetro 1 monitora a corrente do gerador e atesta que o circuito encontra-se fechado. Esse monitoramento é necessário devido às dificuldades de acoplamento das pontas de prova da fonte no trilho e na conexão medida.

No Amperímetro 2, monitora-se a corrente derivada da conexão, ou seja, a corrente que NÃO CIRCULA pela conexão medida e sim pela malha em paralelo. A medida efetiva na CONEXÃO 1 é obtida de forma indireta, subtraindo a corrente derivada para fora da conexão medida ( $I_d$  - Amperímetro 2) da corrente da fonte geradora ( $I_g$ ), ou seja, [ $I_c = I_g - I_d$ ].

A utilização de uma fonte de corrente DC de no mínimo de 100A dá-se pelo fato dos altos níveis de corrente de propulsão que circulam nas conexões. Além disso, o comportamento de um possível mau-contato não é linear, ou seja, a resistência ôhmica em uma conexão não tem o mesmo comportamento mediante a uma variação de corrente que passa por esta.

Sendo assim, alguns parâmetros de aceitação de condição da conexão foram definidos:

A corrente na conexão medida ( $I_c$ ) deve ser maior ou igual a 96% da corrente da fonte geradora ( $I_g$ ), no caso do circuito analisado, maior ou igual a 96A. Logo, a corrente derivada ( $I_d$ ) para fora da conexão medida, não pode ser superior a 4% da fonte geradora ( $I_g$ ), no caso do circuito analisado, maior que 4A.

O processo de validação do método foi realizado através de testes de amostras de conjuntos de conexões, pinos e cabos de interligação instalados no CDV 1W02T. Após substituição das conexões e pinos, foi reaplicado o método e todos os conjuntos não apresentaram "corrente derivadas acima de 4% da corrente da fonte geradora.

No circuito de via 2W02T do X30 foram identificados 52 conexões e pinos fora do parâmetro definido. O processo de substituição dos pinos e cabos de interligação foi efetuado pelas equipes de manutenção de via permanente.

A Tabela 2 mostra uma parte do levantamento de condição dos pinos de interligação instalados no circuito 2W02T com a aplicação do método de medição por "corrente derivada". Em destaque os valores de corrente derivada mais discrepantes.

Tabela 2 - Levantamento de Pinos do CDV 2W02T do X30

Medição X30 - Pinos da Via 2 - Lado TX				
Pino	Corrente (Id)	Situação	MT	Observações
7	6,9A	FIXO	3304/9	CABO CONDENADO
8	2A	FIXO		
19	5,2A	FIXO		Cabo encostando no parafuso de fixação. Isolação danificada - CABO CONDENADO
20	13A	FIXO		
23	0,6A	FIXO		
24	89A	SOLTO sem porca de fixação		
27	30A	FIXO	MT12652	CABO CONDENADO
26	36A	FIXO		CABO CONDENADO
27	65A	FIXO		CABO CONDENADO

A Tabela 3 mostra o levantamento após substituição dos conjuntos de conexões, pinos e cabos de interligação em desvio e reaplicação do método de medição.

Tabela 3 - Substituição de Pinos do CDV 2W02T do X30

Substituição X30 - Pinos da Via 2 - Lado TX				
Pino	Corrente (Id)	Situação	MT	Observações
6	3A	FIXO	3304/9	CABO SUBSTITUÍDO
7	2,4A	FIXO		CABO SUBSTITUÍDO
8	1,8A	FIXO		CABO SUBSTITUÍDO
19	1,7A	FIXO		CABO SUBSTITUÍDO
20	1,7A	FIXO		CABO SUBSTITUÍDO
23	1,4A	FIXO		CABO SUBSTITUÍDO
24	1,4A	FIXO		CABO SUBSTITUÍDO
27	2,8A	FIXO	MT12652	CABO SUBSTITUÍDO (Pino Antigo)
26	3,2A	FIXO		CABO SUBSTITUÍDO (Pino Antigo)
27	2A	FIXO		CABO SUBSTITUÍDO (Pino Antigo)

Conforme mostram os resultados de corrente derivada (*I<sub>d</sub>*) na Tabela 3, após a substituição dos pinos e cabos de interligação no CDV 2W02T constatou-se que a corrente máxima derivada nos pinos instalados foi de 3,6A o que resultou na equalização das correntes de propulsão entre os trilhos C e D e entre as vias 1 e 2.

Apesar da equalização de correntes de propulsão entre os circuitos do intertravamento, constatou-se que o desvio identificado inicialmente, variação da corrente de detecção AC e energização do relé de ocupação, ainda estava presente, caracterizando a necessidade de comprovar o correto funcionamento das impedance bonds instaladas na via.

### **Testes Dinâmicos de Impedance Bonds**

As impedance bond ou bobinas de impedância são componentes extremamente robustos e projetados para operar com correntes de 1500A por bobina em regime contínuo e permitir um desequilíbrio de corrente de propulsão de no máximo 12%. Se houver um desequilíbrio de corrente, a diferença produzirá um fluxo magnético no núcleo de ferro que tenderá a saturá-lo reduzindo sua reatância (AC).

Com base nestas características, iniciou-se um estudo de comportamento e levantamento de informações que justificassem os desvios que estas sofrem em seu funcionamento mediante as correntes de propulsão DC e os efeitos nas correntes de detecção AC.

Para tanto foi elaborado um teste em oficina com o objetivo de testar dinamicamente as impedance bond. O teste consiste em simular, através de um gerador de corrente DC, as

correntes de propulsão dos trens e sua influência no funcionamento das impedance bond monitorando os efeitos da variação dessas correntes no sinal de detecção AC.

Para o teste foram adaptados corpos de prova (seções reduzidas de trilhos) e caixas de controle de corrente de detecção AC, de modo a reproduzir um "mini" circuito de via. As impedance bonds são conectadas nos trilhos e no gerador de corrente DC, conforme Figura 14.

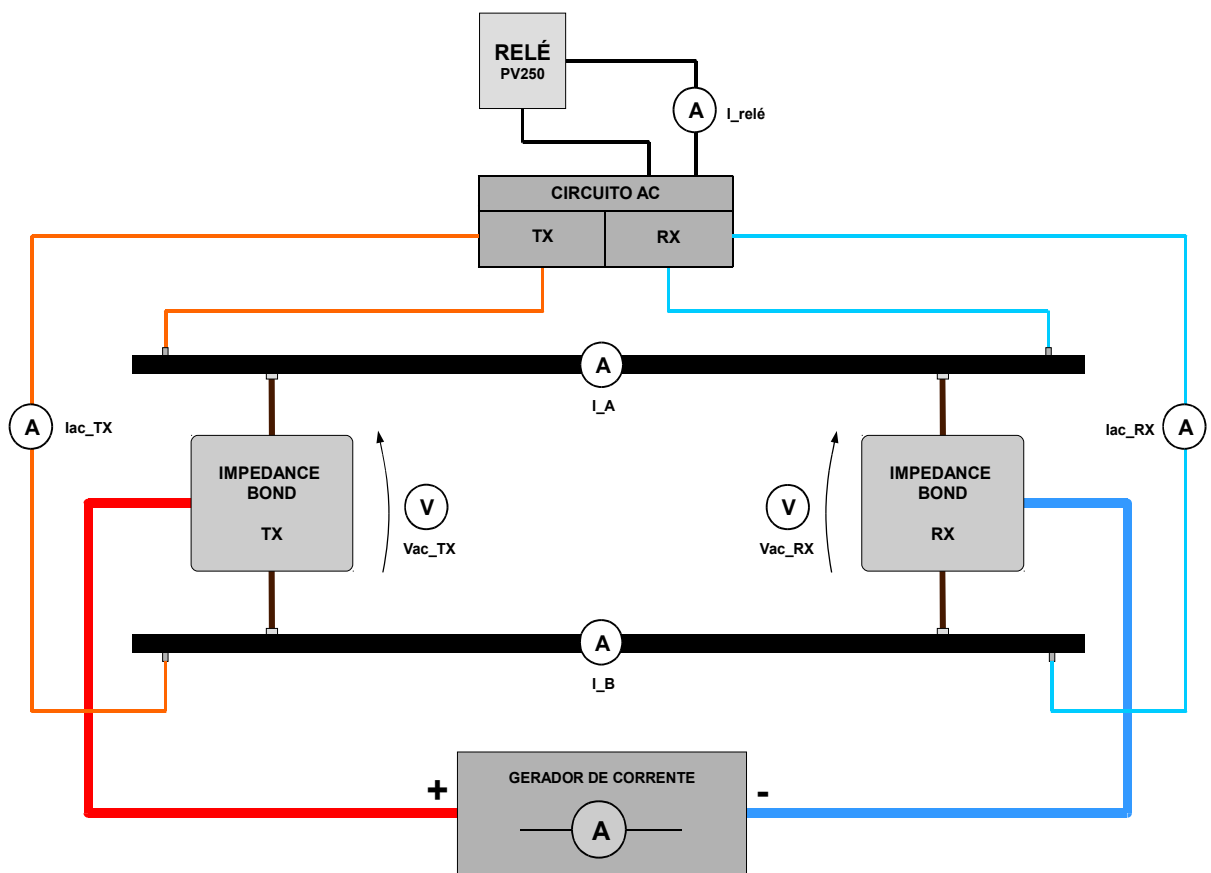


Figura 14 - Diagrama do teste dinâmico de impedance bond

Onde:

- Corrente de Propulsão do trilho "A" ( $I_A$ );
- Corrente de Propulsão do trilho "B" ( $I_B$ );

- Tensão AC de saída do circuito transmissor ( $V_{ac\_TX}$ );
- Corrente AC do circuito transmissor ( $I_{ac\_TX}$ );
- Tensão AC de retorno da via para o circuito receptor ( $V_{ac\_RX}$ );
- Corrente AC de retorno da via para o circuito receptor ( $I_{ac\_RX}$ );
- Corrente de saída do circuito Receptor e energização do relé de ocupação ( $I_{relé}$ );

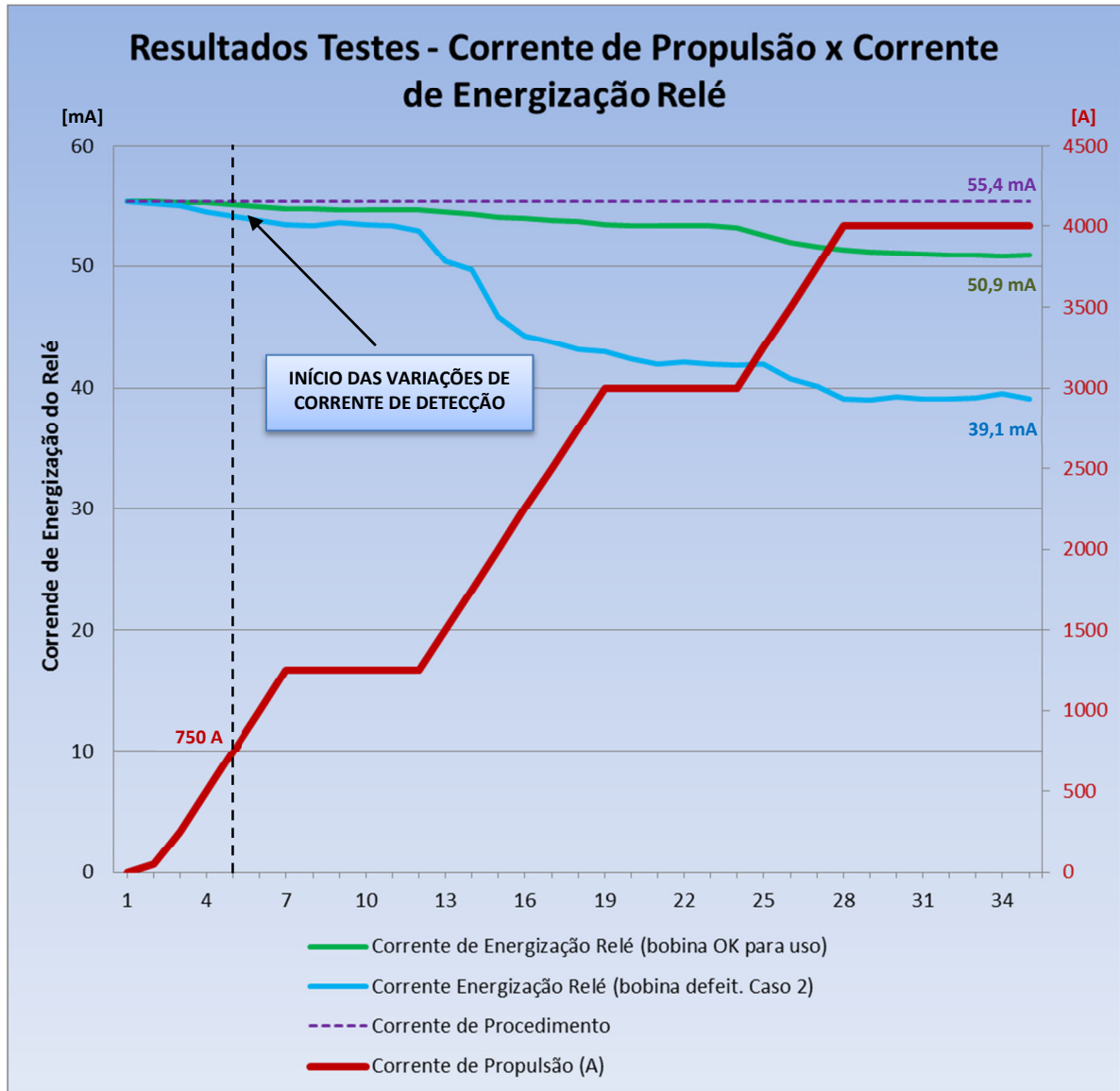
Como é possível controlar os níveis de corrente do gerador, pode-se determinar as características e condições de funcionamento das impedance bonds instaladas ou após serem submetidas a processos de manutenção.

O teste consiste na energização do circuito de detecção AC, do gerador de corrente DC e aumento gradativo da corrente de saída do gerador até que se alcance um limite de 4000A, valor convencionado para realização dos testes em ambiente controlado.

Em condições normais de operação, o aumento da corrente de propulsão e suas variações, não afetam as características elétricas e comportamento do funcionamento das impedance bonds para o circuito de detecção AC, ou seja, a corrente de consumo AC da impedance bond não deve sofrer variações com a incidência de corrente de propulsão na mesma.

Para os testes foram utilizadas impedance bonds de estoque. Foram realizados diversos testes e identificou-se que a partir de um determinado nível de corrente de propulsão DC, as impedance bond começam a sofrer alterações em seu funcionamento e como consequência começam a drenar mais corrente de detecção AC do circuito de controle.

Segue um gráfico na Figura 15 com o comportamento das impedance bond e sua influência na corrente de detecção de acordo com corrente de propulsão aplicada.



**Figura 15 - Comparativo de resultados dos testes dinâmicos de impedance bond**

O aumento da corrente de propulsão de maneira geral evidenciou um desvio no funcionamento das impedance bonds. Com os testes, foi possível comprovar o comportamento destas mediante a incidência de corrente de propulsão superiores a 750A por trilho com alteração das características indutivas e resistivas da impedance bond, e



consequente aumento do consumo de corrente de detecção de ocupação causando a desenergização do relé de ocupação, visto que a queda de corrente de detecção chega à faixa de 20mA, e conseqüentemente geração da falsa ocupação com o aumento da corrente de propulsão.

Os dados levantados possibilitaram identificar os sintomas observados em atuações na falha de falsa ocupação intermitente do CDV 1W02T (X30) e a correlação entre efeitos desvios levantados em campo e os testes em oficina.

Os testes evidenciaram a importância de uma pesquisa mais aprofundada das possíveis causas que geram os desvios funcionais nas impedance bonds.

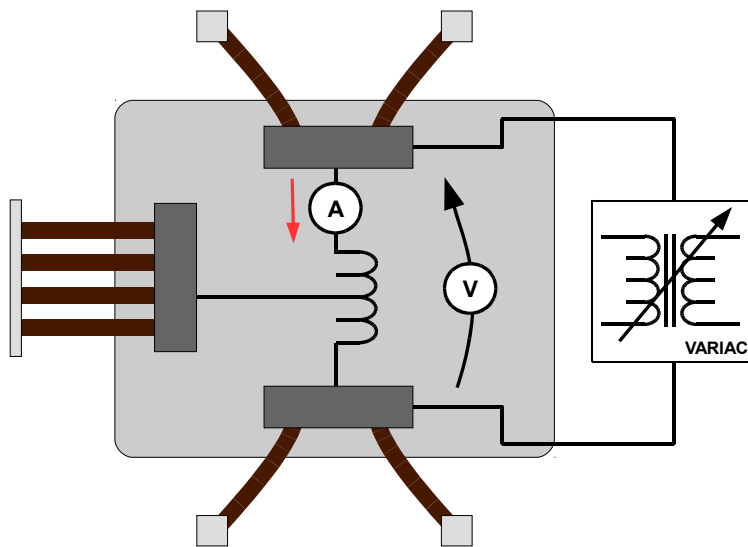
Explorando o processo de manutenção das impedance bond em oficina (processo de retirada de composto petrolato, desmontagem de componentes, testes de isolamento, resistência de bobinas e medição de impedância da bobina) verificou-se que o parâmetro de impedância da bobina operando com frequência de trabalho de 60Hz apresentava um valor acima do previsto pelo fabricante, a saber, valor de  $0,5\Omega$  à 60Hz. Não havia informações de tolerâncias de ajustes para esse parâmetro. Além disso, os efeitos de alteração desse parâmetro no funcionamento da impedance bond não eram conhecidos.

Estudando a construção da bobina e de seu núcleo de ferro verificou-se que o ajuste da impedância está relacionado principalmente ao espaçamento do GAP de ar no núcleo de ferro, que é realizado através de placas espaçadoras de fibra de vidro.

Dessa forma, para verificação e ajuste desse parâmetro foi utilizado um transformador VARIAC, um multímetro TRUE RMS para verificação da tensão aplicada e amperímetro AC.

Assim, com as duas grandezas monitoradas, obtém-se o valor da impedância da bobina, conforme Figura 16.

A componente indutiva é desconsiderada, visto que a resistência é considerada pura.



**Figura 16 - Método de medição de impedância bond em oficina**

Aplicando os níveis de tensões nos terminais das bobinas, mede-se a corrente drenada pela impedância bond e efetua-se o cálculo para obter o valor real da impedância na bobina.

Definiu-se que quando o parâmetro de impedância estiver acima de  $0,5\Omega$  o GAP deverá ser diminuído, substituindo a placa espaçadora por uma de espessura menor. No caso de impedância abaixo de  $0,5\Omega$  o GAP deverá ser aumentado, substituindo a placa espaçadora por uma de espessura maior.

As impedância bonds utilizadas nos teste dinâmicos passaram por um novo processo de manutenção e verificação do parâmetro de impedância da bobina à 60Hz e constatou-se que

uma das impedance bonds apresentava o valor de impedância 4 vezes superior do que o especificado pelo fabricante, ou seja,  $2\Omega$ . As outras impedance bond apresentaram impedância de  $0,62\Omega$  à 60Hz.

A alteração nesta impedância justifica o quadro de saturação da bobina quando do aumento de corrente de propulsão e conseqüentemente, maior consumo de corrente de detecção AC. Os testes indicaram que as impedance bond apresentam melhor desempenho em 60Hz quando ajustadas em  $0,5\Omega \pm 10\%$ .

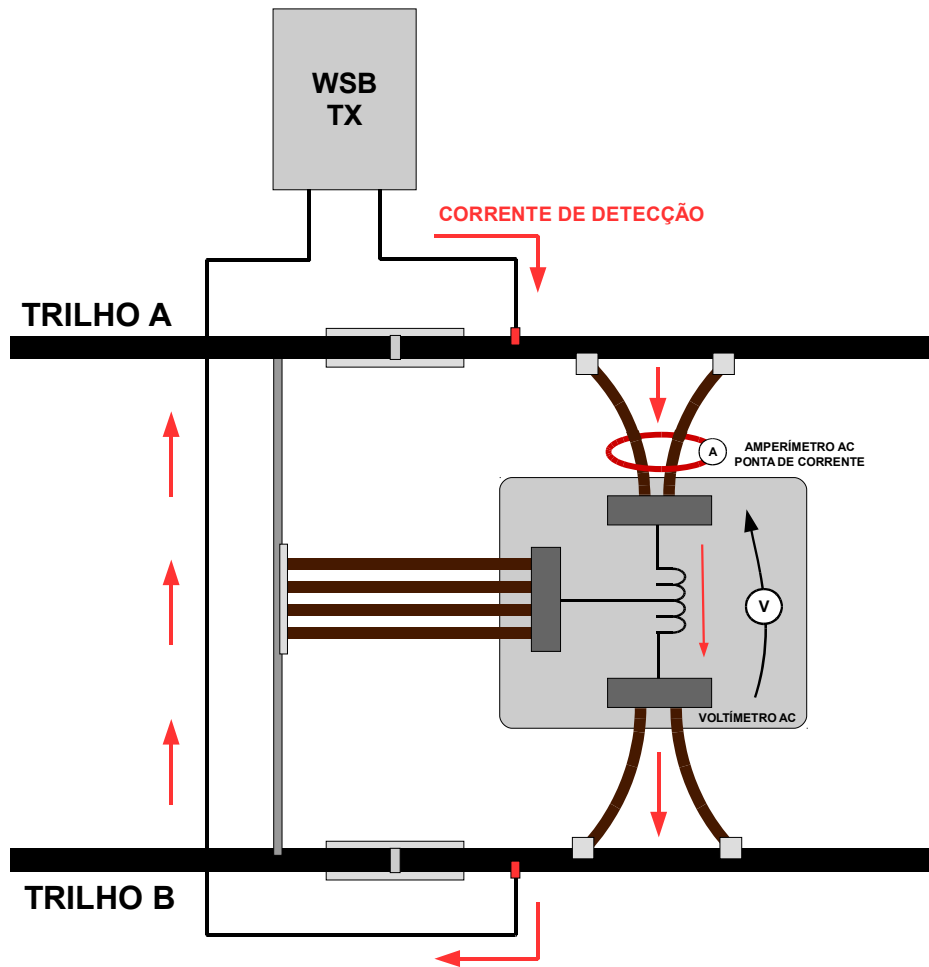
Após ajuste das bobinas e reaplicação dos testes dinâmicos nestas, não mais houveram variações na corrente de detecção AC de acordo com o aumento da corrente de propulsão DC, comprovando a validade e eficácia do ajuste.

#### **Método de medição/inspeção de impedance bond instalada na via permanente**

Antes do estudo aprofundado de funcionamento e comportamento das impedance bond, era muito difícil constatar falhas nestes componentes quando instalados na via permanente. Os parâmetros definidos, após o estudo realizado, para atestar o correto funcionamento das impedance bond incluem a verificação de desbalanceamento de corrente de propulsão menor que 12% entre tapes de saída, impedância das bobinas mediante a circulação de corrente AC 60Hz de  $0,5\Omega \pm 10\%$  e inspeções visuais de conexões, condição do petrolato e vedação.

Devido a necessidade de medir o parâmetro de impedância da impedance bond instalada na via sem a necessidade de desconexão do circuito, observou-se a possibilidade de utilização da própria corrente de detecção AC para medição da impedância da bobina.

A Figura 17 mostra a aplicação do método de medição da impedance bond instalada na via:



**Figura 17 – Método de medição e aferição de impedance bond instalada na via**

Na via mede-se nos terminais de entrada da impedance bond, a tensão do sinal de detecção AC e a corrente AC drenada por esta impedance nos cabos conectados ao trilho. Com a verificação desses parâmetros de funcionamento, é possível atestar o funcionamento das impedance bonds de forma concreta em ambiente de via permanente.

A queda de tensão na impedance bond deve ser coletada diretamente na entrada das bobinas. Tal medida deve ser feita para evitar que possíveis quedas de tensão oriundas de mau-contato dos pinos e conectores da impedance bond nos trilhos influenciem no resultado da medida.

Aplicando o método de medição e inspeção nas impedance bonds instaladas no intertravamento verificou-se que as 4 impedance bond instaladas estavam com o parâmetro de impedância de 0,5Ω à 60Hz fora do especificado, conforme resultados na Tabela 4.

**Tabela 4 - Medição das impedance bonds instaladas no X30**

<b>MEDIÇÃO DAS IMPEDANCE BONDS INSTALADAS NO X30</b>					
<b>CIRCUITO DE VIA (CDV)</b>	<b>LADO</b>	<b>TENSÃO MEDIDA (VCA)</b>	<b>CORRENTE MEDIDA (ICA)</b>	<b>IMPEDÂNCIA CALCULADA (Ω)</b>	<b>SITUAÇÃO</b>
1W02T	TX	2,11	5,17	0,41	<b>FORA DE ESPECIFICAÇÃO DE USO</b>
	RX	1,77	1,94	0,91	
2W02T	TX	2,02	3,03	0,67	
	RX	1,62	1,64	1,00	

Na via 1 foram substituídas as impedance bond TX e RX do CDV 1W02T e efetuado o processo de ajuste e teste. A corrente de detecção e retorno para energização do relé de ocupação ESTÁVEL em 54mA com defasagem de 88° entre os sinais da sala técnica e via.

Na via 2 foram substituídas as impedance bond TX e RX do CDV 2W02T. Após processo de inspeção, ajuste e testes, a corrente de detecção e retorno para energização do relé de ocupação ESTÁVEL em 51mA e com defasagem de 89° entre os sinais da sala técnica e via.

Com a substituição dos pinos e cabos de interligação dos circuitos 1W02T e 2W02T e impedance bonds dos respectivos circuitos obteve-se a solução final da falha com a **EQUALIZAÇÃO DE CORRENTES DE PROPULSÃO ENTRE TRILHOS DOS CIRCUITOS E ESTABILIZAÇÃO DA CORRENTE DE DETECÇÃO AC.**

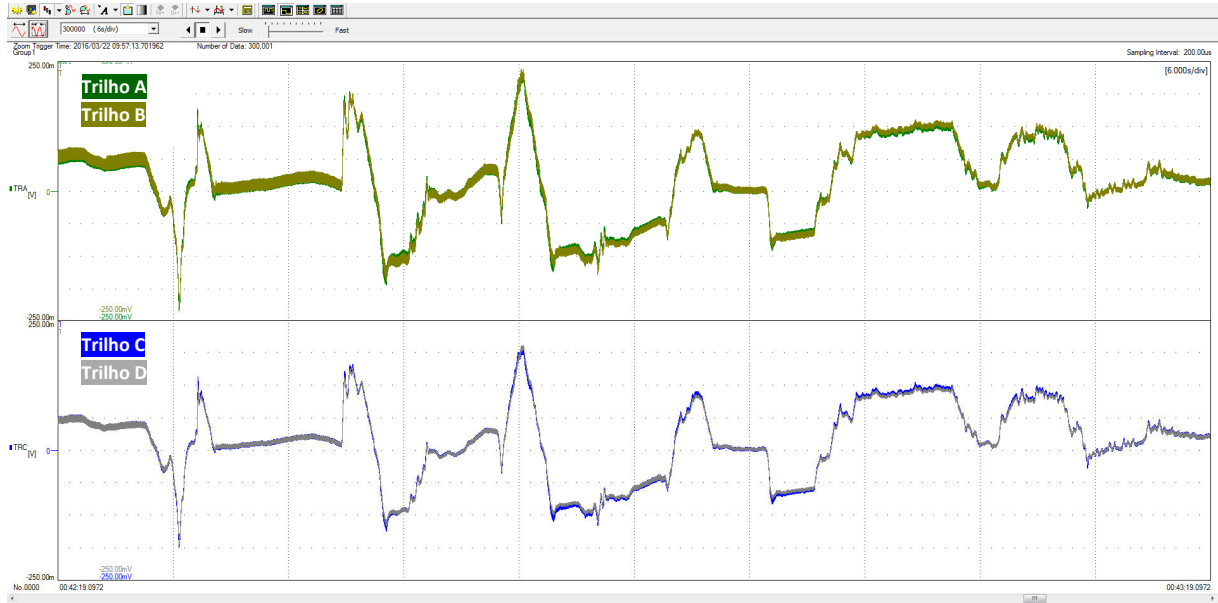
Analisando os resultados e levantamentos obtidos durante as atuações na falha verificou-se a dependência dos dois principais desvios identificados.

Impedância das bobinas alteradas a 60Hz fazendo com que as características de funcionamento das mesmas apresentassem desvio. Dessa forma, a impedance bond deixava de operar normalmente, com divisão equalizada de correntes de propulsão entre trilhos, aproximadamente 1500A por trilho em regime contínuo de trabalho, sofrendo o processo de saturação magnética do núcleo.

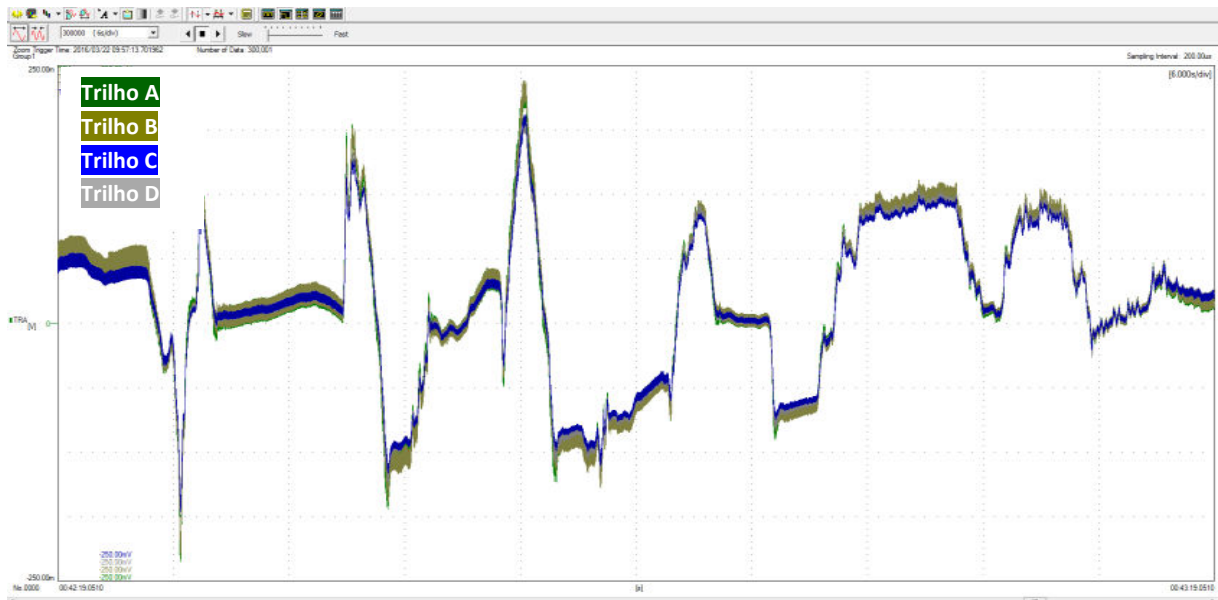
O desbalanceamento de corrente de propulsão na via 2 resultado da resistência ôhmica dos circuitos alterada devido a resistências de contato dos pinos e cabos de interligação, faziam com que parte da corrente de propulsão que deveria circular pela via 2 migrasse para o circuito da via 1 fazendo com que os níveis de corrente na via 1 fossem consideravelmente maiores que na via 2 (em média 30%).

A dependência dos desvios dá-se pelo fato de que, a existência de apenas um efeito desvio não resulta na falha de variação da corrente de detecção e conseqüentemente a falsa ocupação no circuito associado.

No entanto verificou-se que o efeito desvio apresentado nas impedance bonds tem maior implicação no cenário de falhas, visto que estes já resultam na variação da corrente de detecção AC. A Figura 18 mostra as correntes circulantes na via 1 e via 2 do X30 após a solução da falha. A Figura 19 apresenta as correntes equalizadas nos trilhos A, B, C e D:



**Figura 18 – Correntes de propulsão equalizadas nas vias 1 e 2**



**Figura 19 – Correntes de propulsão equalizadas nos trilhos A, B, C e D**

Após solução da falha monitorou-se as correntes de detecção que se mantiveram estabilizadas, sem variação, e não ocorreram mais variações de correntes de detecção AC e falsas ocupações no circuito 1W02T mesmo com a concentração de trens na região do intertravamento, conforme a Figura 20:

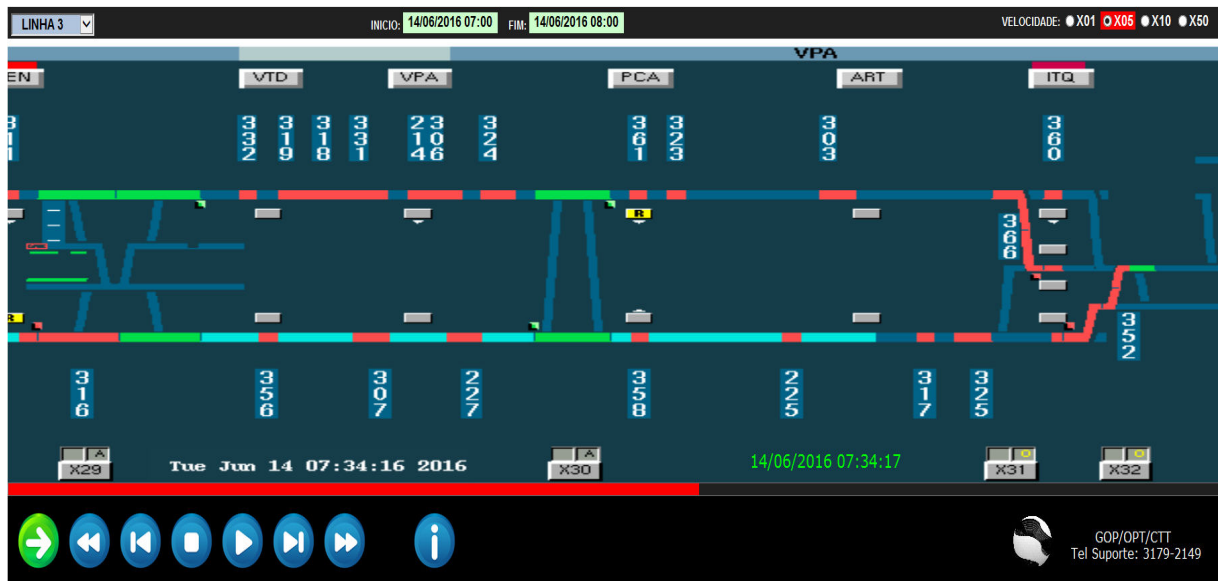


Figura 20 - Concentração de trens na região do X30



## **Método de identificação de fuga de corrente de detecção através de "curto circuito controlado"**

Em cenários de falsas ocupações em circuitos AC, o rápido levantamento de desvios e a definição do ponto comum da falha são imprescindíveis. As falhas podem se apresentar na sala técnica ou no circuito de via, nos elementos que compõem o circuito AC.

Após definição de falha no circuito de via, o primeiro desvio a ser observado é a corrente de retorno para a sala técnica na caixa receptora (RX), que irá energizar o relé de ocupação. Em geral essa corrente é resultado da corrente, enviada à via pela caixa transmissora do circuito (TX) devendo estar dentro dos parâmetros de nível e defasagem ajustados em procedimento de ajuste e testes do circuito.

Em casos de falha de fuga de corrente, parte da corrente que deveria estar disponível na caixa receptora pode migrar para o terra estrutural através de componentes de fixação do trilho na via, corpos estranhos ou até mesmo através de componentes do AMV.

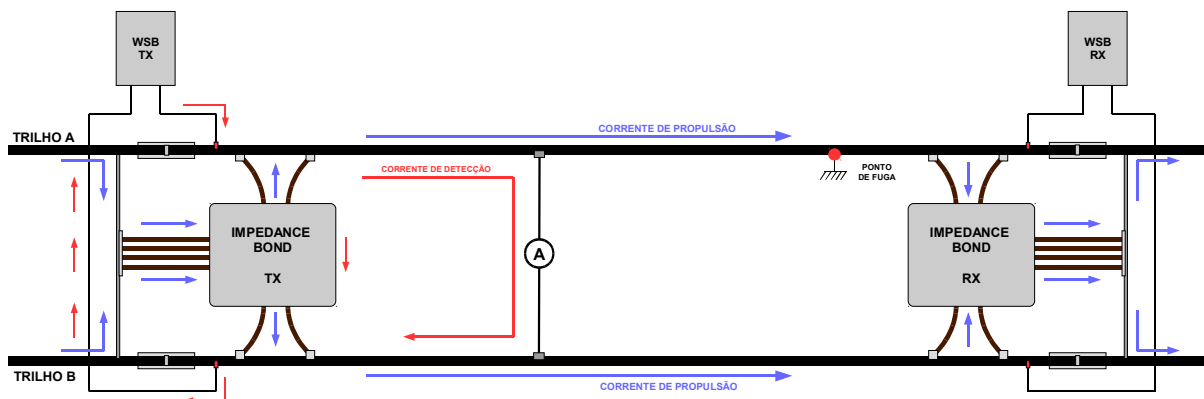
O resultado de fugas como as citadas, resulta em falsas ocupações, ou seja, a corrente de retorno para a sala técnica não irá atingir patamar suficiente para energização do relé de ocupação, mantendo o mesmo desenergizado ou "caído".

Um dos métodos convencionais de atuação para identificar o ponto de fuga é a medição da diferença de potencial ao longo do circuito e uma possível queda brusca da tensão AC na região do ponto de fuga. Porém em determinados casos, não há queda acentuada de tensão AC na região do ponto de fuga, pois a corrente AC apesar de migrar para o ponto de fuga, não está no mesmo potencial elétrico do circuito de via.

Nesses casos, a identificação só pode ser feita através de inspeção do circuito. A pesquisa da falha se torna extremamente demorada, quando o ponto de fuga não é visível e identificável através da inspeção visual ou utilizando o termovisor. A utilização do termovisor também é debilitada em ambientes onde os circuitos estão expostos à luz solar.

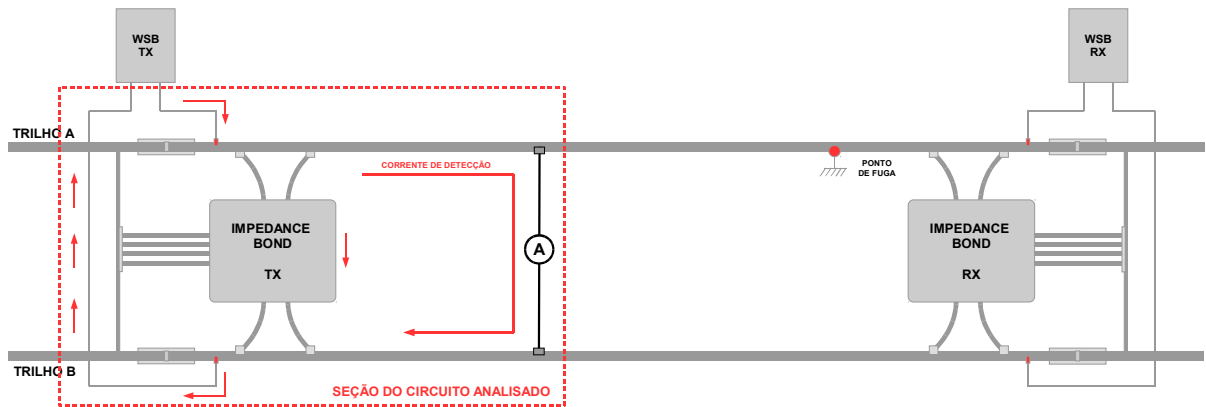
Outro método convencional de atuação nesses casos prevê a utilização de um instrumento que mede a corrente AC através de uma ponta flexível conectada a um osciloscópio ou multímetro TRUE RMS. Esse processo é válido quando da pesquisa de falhas sem a presença de corrente de propulsão no circuito. O ripple gerado pela retificação hexafásica, interfere diretamente na medida do instrumento, já que o mesmo efetua a leitura do campo magnético gerado pela passagem da corrente elétrica AC e da componente AC (ripple) resultante do processo de retificação na seção de trilho medida.

Sendo assim, para que os efeitos da retificação não interfiram na medição da corrente de detecção que circula pelos trilhos, foi elaborado um método de atuação que visa a equipotencialização dos trilhos de retorno, através de um curto-circuito e efetuada somente a medição da corrente de detecção no cabo do curto-circuito, conforme Figura 21.



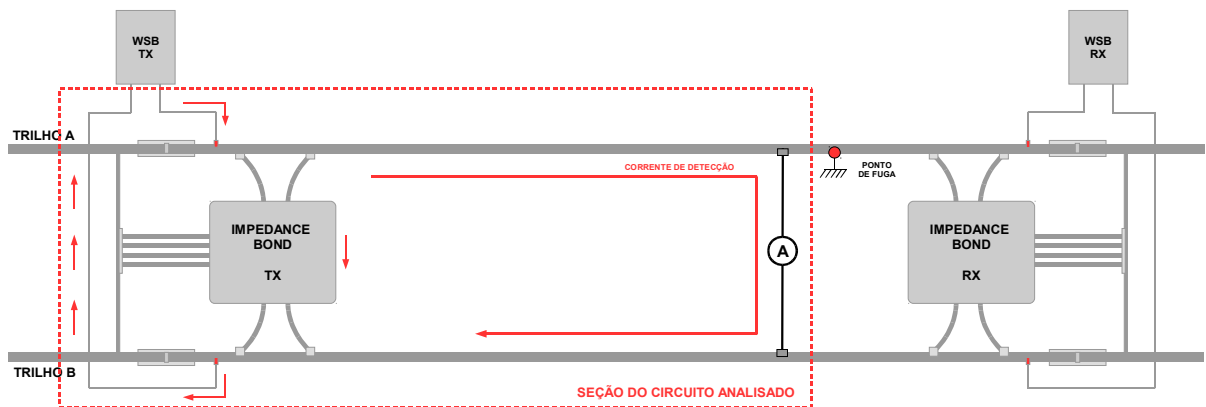
**Figura 21 – Diagrama do Método “Curto-circuito Controlado”**

O resultado da medição é somente a parcela de corrente de detecção que passa pela seção do circuito AC analisada, sendo esta corrente, igual ou próxima da corrente de ocupação do circuito (vide folha de dados da caixa TX associada), conforme representação na Figura 22.



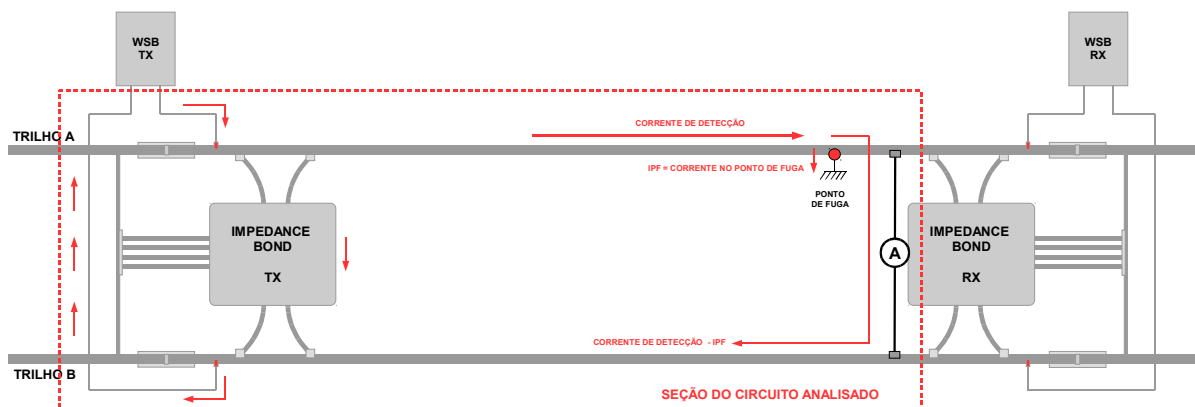
**Figura 22 – Utilização do método - parte 1**

Observa-se que até o ponto de fuga a corrente de detecção é a mesma, ou seja, não sofre variação ou atenuação no nível de corrente medido. Vide Figura 15.



**Figura 23 – Utilização do Método - parte 2**

Com o avanço da medição do circuito e passagem pelo ponto de fuga, tem-se a queda e/ou variação da corrente de detecção, visto que o ponto de fuga vai drenar parte dessa corrente. Vide Figura 16.



**Figura 24 – Utilização do método - parte 3**

Dessa forma, com mais algumas medições ou inspeção visual, é possível identificar o ponto de fuga de corrente de detecção AC.

Após elaboração, o método se mostrou eficiente em duas ocasiões de falhas de falsa ocupação, a saber, no CDV 2W09T do X24 de Tatuapé (TAT), sendo esta falha a motivação para elaboração do método, devido a grande interferência operacional que foi gerada. Outra ocasião foi enfrentada em atuação numa falsa ocupação no CDV 2E03T do X21 de Praça da Sé (PSE).

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

As metodologias elaboradas mostram-se eficazes para a análise e atuações em falhas nos circuitos de detecção de ocupação AC 60Hz que se apresentam no cenário atual das linhas do Metrô de São Paulo. O aumento de trens nas linhas e reforma da frota existente fizeram

com que os níveis de corrente de propulsão aumentassem de forma significativa a ponto de interferir no funcionamento dos circuitos AC. A aplicação das metodologias otimizaram os processos de atuação e permitiram identificar e sanar os problemas relacionados a essa característica específica.

As técnicas propostas são bem versáteis e possibilitam a utilização pelas equipes de manutenção preventiva e corretiva, visto o aspecto preventivo, preditivo e corretivo de acordo com cada técnica.

A aplicação da técnica de aquisição de correntes por diferença de potencial possibilitou analisar as correntes de propulsão circulante em tempo real e seus efeitos no circuito AC. A partir do momento em que foi possível “enxergar” a corrente de propulsão no circuito, as atuações em busca de desvios funcionais nos componentes do circuito causados pelo aumento da corrente de propulsão puderam ser identificados e estudados.

Com a técnica de medição de pinos e conexões por “corrente derivada”, é possível a identificação pontual e precisa do pino ou conjunto de conexões a serem substituídos e as condições de cada um destes, evitando a troca desnecessária de pinos e/ou conexões e consequente diminuição dos tempos de atuação das equipes de manutenção preventiva.

O estudo de funcionamento da impedance bond mostrou através dos testes realizados a relevância desse componente para o funcionamento do circuito AC. O acompanhamento do processo de manutenção fez com que fosse identificado um parâmetro de ajuste das impedance bond fora do valor requerido para o correto funcionamento.

Além disso, foi elaborada uma técnica para verificação de funcionamento das impedance bond instaladas na via utilizando a própria corrente de detecção, sem a necessidade de remoção do componente de forma desnecessária.

A técnica de identificação de pontos de fuga de corrente de detecção por “curto circuito controlado” mostrou-se eficaz e diminuiu significativamente o tempo de atuação nesses tipos de ocorrências, além de possibilitar a identificação precisa de pontos de fuga de corrente de detecção em circuitos AC.

A aplicação destas metodologias foi determinante para o sucesso das pesquisas, atuações e solução da falha do CDV 1W02T de PCA (X30), mostrando serem importantes ferramentas para auxiliar nas atuações nesses tipos de circuitos.

Além disso, agregou ao corpo técnico um aumento da compreensão dos circuitos AC. Evidenciou-se que a análise de falhas nos circuitos das regiões de intertravamento devem ser interpretados como uma soma de circuitos em paralelo e necessitam de uma análise ampla e generalizada devendo apresentar comportamentos semelhantes.

As técnicas tendem a aumentar a disponibilidade do equipamento já que facilitam a identificação de desvios funcionais nos componentes dos circuitos AC e ainda possibilitam o monitoramento preditivo do comportamento do circuito e conseqüentemente antecipação a desvios funcionais e falhas em potencial, com prováveis interferências operacionais.

Deve-se salientar a importância da utilização e auxílio dos instrumentos e ferramentas de análise disponíveis na Companhia, os quais foram fundamentais para elaboração, testes e validação dos métodos.

Por fim, os ganhos obtidos pela criação de um grupo de pesquisa e estudo para circuitos de detecção AC 60Hz foram imprescindíveis para o sucesso das técnicas e solução das falhas que se apresentaram durante todo o período de pesquisa de falhas, conforme estudo de caso. Tais vantagens foram positivas devido à continuidade das atuações, foco nas pesquisas, "know-how", e desenvolvimento de técnicas específicas para lidar com desvios que até então não se apresentavam nos circuitos de detecção AC 60Hz.

## **CONCLUSÕES**

O grande número de usuários do Metrô de São Paulo faz deste o principal meio de transporte da cidade. Os equipamentos de sinalização e controle de trens precisam ser confiáveis para a fluidez e o bom desempenho do sistema. O trabalho apresentado evidencia a importância da aplicação das metodologias em circuitos de via de detecção de ocupação AC 60Hz, visto sua relevância e seu caráter preditivo de alguns métodos, visando no aumento da disponibilidade do equipamento, a constante redução de falhas, a otimização dos processos de atuações e resultando na mínima ou quase nula interferência operacional ao sistema.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Site Oficial: <http://www.metro.sp.gov.br/metro/numeros-pesquisa/indicadores.aspx>. Acesso em 26/06/2016.

Documento Técnico da Companhia do Metropolitano: PRO-M-T-4WX-002 - Inspeção, Ajuste e Teste para Caixas a margem de via AC.

RACHEL, Flávio Monteiro - PROPOSTA DE UM CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE TRENS UTILIZANDO LÓGICA NEBULOSA PREDITIVA. Acesso em 07/07/2016.