

Giovani Sorice Neto

Mário Shoyama Jr.

Silmara da Conceição Martinez

**Estudo para detecção de problemas nos motores dos trens através
da análise da corrente elétrica**

São Paulo

2007

Giovani Sorice Neto

Mário Shoyama Jr.

Silmara da Conceição Martinez

**Estudo para detecção de problemas nos motores dos trens através
da análise da corrente elétrica**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, dentro da
especialização em Tecnologia Metro-Ferroviária
desenvolvido no âmbito do Programa de
Educação Continuada em Engenharia – PECE.

Área de Concentração: Sistemas de Potência
Orientador: Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu

São Paulo

2007

ESP/TMF

2007

M366e

DEDALUS - Acervo - EPEL



31500019014

FICHA CATALOGRÁFICA

M2007CG

Martinez, Silmara Conceição; Shoyama Jr., Mário; Sorice Neto, Giovani
Estudo para detecção de problemas nos motores dos trens através da análise da
corrente elétrica. / Giovani Sorice Neto, Mário Shoyama Jr., Silmara Conceição
Martinez; orient. Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu -- São Paulo, 2007.
69p.

Monografia (Especialização) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Programa de Educação Continuada em Engenharia – PECE.

1. Monitoramento de máquinas elétricas corrente contínua. 2. Assinatura da
corrente elétrica. 3. Detecção de defeitos.

I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação
Continuada em Engenharia – PECE. II. t.

1794258

AGRADECIMENTOS

À Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRÔ e à Secretaria dos Transportes Metropolitanos – STM, sem as quais não teria sido possível a realização deste curso;

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, através de seu Programa de Educação Continuada em Engenharia – PECE;

Aos colegas de curso, pelos momentos de parceria e solidariedade;

Aos colaboradores diretos neste trabalho, o Eng.º Eduardo Ferreira da Silva e João Batista Rodrigues;

Aos nossos familiares, pelo apoio incondicional em todos os momentos.

E às pessoas que direta ou indiretamente nos auxiliaram no decorrer deste trabalho e também do curso em questão:

Gerência de Manutenção: Jorge Martins Secall.

Depto. de Engenharia: Edson Watanabe, José Humberto Gaiani e Humberto Massahiko Kimura.

Depto. de Material Rodante: Walter Ferreira de Castro Filho e Roberto Torres Rodrigues

RESUMO

A proposta deste trabalho é verificar a possibilidade de estabelecer uma correlação entre os problemas apresentados nos motores de corrente contínua, embarcados nos trens do Metrô de São Paulo, e o respectivo espectro de frequências da corrente elétrica consumida, e desta forma permitir futuramente a implementação de um sistema de detecção de defeitos. A metodologia adotada no trabalho foi a obtenção de dados através da medição e análise da corrente elétrica consumida pelos motores de corrente contínua instalados nos trens, em regime normal de trabalho, através de um analisador dinâmico de espectro acoplado a transdutores de corrente. Através da comparação dos dados obtidos em campo, verifica-se a possível existência de uma correlação entre os espectros de frequências obtidos nos testes e os respectivos problemas conhecidos e acompanhados, comparando os dados de motores saudáveis com aqueles em acompanhamento. Porém, esta técnica não permite classificar os tipos de falhas. Os resultados de medições experimentais mostraram que a estratégia de detecção de falhas proposta é uma promissora alternativa para a monitoração em tempo real da máquina de corrente contínua (uma vez que as medições são realizadas durante o período de operação comercial) e pode se tornar uma ferramenta interessante para a manutenção preditiva das mesmas.

ABSTRACT

The purpose of this work is to verify the possibility of establishing a correlation between the problems presented in direct current motors installed in São Paulo Subway trains and the respective current frequency spectrum, by this way, permitting the implementation of a fault detection system. The used methodology was the data acquisition by measurement and analyzes of the electric current consumed by the dc motor installed on the trains, at normal work conditions, using a spectrum dynamic analyzer attached to current transducers. By comparison the field obtained data, it was checked the existence of a relation among the frequency spectrum from the tests and the respective known and followed problems, comparing the data from healthy motors and those in study. However, this technique is not useful to classify the type of these imperfections. The experimental measurement results showed the failure detection strategy proposed is a promising alternative for the real time direct current machine monitoring. Considering the measurement is made during the commercial operation, this approach may become an interesting tool for their predictive maintenance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de Montagem do Motor ao Truque - Fonte Manual GEVISA	23
Figura 2 - Vista Geral do Motor e Caixa de Engrenagens - Fonte Manual GEVISA	24
Figura 3 – Distribuição das Ocorrências no Motor de Tração – anos 2005 e 2006.	27
Figura 4 – Comutador Excêntrico – detalhe ilustrativo.	28
Figura 5 – Lâmina do Comutador defeituosa – Desnívelamentos da superfície detalhe ilustrativo.	31
Figura 6 - Lâmina do Comutador defeituosa – Barras Salientes – det. ilustrativo.	32
Figura 7 – Mica Alta – detalhe ilustrativo.	35
Figura 8 – Registro do trem 17 na linha de teste	42
Figura 9 – Registro do trem 351 alimentado com a retificadora de solda	44
Figura 10 – Retificador de solda com carga resistiva	44
Figura 11 – Registro do trem 6 alimentado com a fonte de corrente do Metrô / motor a 250 RPM	46
Figura 12 – Fonte Metrô com carga resistiva	47
Figura 13 – Montagem do circuito de alimentação – conjunto de baterias	48
Figura 14 – Registro do trem 44 alimentado com baterias e instrumentação inadequada	49
Figura 15 - Registro do trem 37 alimentado com baterias e instrumentação inadequada	51
Figura 16 – Esquema elétrico da configuração final de teste	52
Figura 17 – Registro produzido com a instrumentação final	53
Figura 18 – Assinatura de corrente de um motor sem falha	54
Figura 19 – Assinatura de corrente de um motor com rotor desbalanceado / 5 kHz.	55
Figura 20 - Assinatura de corrente de um motor com rotor desbalanceado / 1kHz	56
Figura 21 - Trem 11- C 1042 Pos 4- Motor 510- desbalanceado	57

Figura 22 - Assinatura de corrente de um motor com má lubrificação / trem 29	58
Figura 23 - Assinatura de corrente de um motor com má lubrificação / trem 10	58
Figura 24 – Trem 29 – C1119 pos 2 – motor 49- má lubrificação	59
Figura 25 - Pontos de Medição da Vibração	65
Figura 26 - Vista geral do Teste de Giro	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Falhas Motores de Tração - 2005 e 2006

26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A (Ampère) – Unidade de medida de Corrente Elétrica

A.h (Ampère-hora) – Unidade de energia ou capacidade de carga de uma bateria

CC – Corrente Contínua

DC (Direct Current) – Corrente Contínua

RPM – Rotações Por Minuto

TIG (Tungsten Inert Gás) – Solda sem adição de material, com eletrodo não consumível de tungstênio em atmosfera inerte.

Vcc – Unidade de medida de Tensão contínua.

HP (Horse Power) – Unidade de medida de Potência.

Hz (Hertz) – Unidade de medida de frequência.

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω (Ohms) – Unidade de medida de Resistência Elétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DEFEITOS	17
3 OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO	20
4 MOTOR DE TRAÇÃO DO SISTEMA METROVIÁRIO	21
4.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	21
4.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	25
4.3 LEVANTAMENTO DOS DADOS – TIPOS DE OCORRÊNCIA	26
4.3.1 Comutador excêntrico	27
4.3.2 Ruído anormal	28
4.3.3 Rolamento defeituoso	29
4.3.4 Carbonizado	29
4.3.5 Lâmina do comutador com defeito.	30
4.3.5.1 Desnivelamentos da superfície	30
4.3.5.2 Barras salientes	31
4.3.6 Baixa isolação	33
4.3.7 Trincado	34
4.3.8 Mica alta	34
4.3.9 Colarinho defeituoso / Isolação colarinho rompida	36
4.3.10 Bandagem defeituosa	36
4.3.11 Cabo defeituoso	37
4.3.12 Labirinto entupido	37
4.3.13 Rosca defeituosa – Fixação	38
4.3.14 Travado	38
4.3.15 Desbalanceado - Desbalanceamento no núcleo do rotor ou eixo	39
5 METODOLOGIA	40
5.1 ETAPA 1 - LINHA DE TESTE	41
5.2 ETAPA 2 – TESTE DE GIRO COM RETIFICADORA DE SOLDA	43
5.3 ETAPA 3 – TESTE DE GIRO COM FONTE DE CORRENTE CMSP	45
5.4 ETAPA 4 – TESTE DE GIRO COM BATERIA E CARGA RESISTIVA DO TREM	47
5.5 ETAPA 5 - TESTE DE GIRO COM BATERIA E CARGA RESISTIVA EXTERNA	51
6 RESULTADOS	54

7 CONCLUSÃO	60
REFERÊNCIAS	62
ANEXOS	63

1 INTRODUÇÃO

A operação comercial do Metrô de São Paulo, iniciada em setembro de 1974, vem apresentando com o passar dos anos, um aumento de demanda que obriga o seu corpo técnico a buscar inovações tecnológicas que viabilizem a oferta de um serviço de qualidade e segurança para um público cada vez mais numeroso e exigente. E o desafio é ainda maior quando se sabe que esta excelência deve ser atingida com custos e investimentos cada vez menores.

Em busca da redução da indisponibilidade inerente ao sistema metroviário, os empregados do Metrô de São Paulo vêm trabalhando para implementar novos métodos para reduzir a quantidade de ocorrências na operação comercial, investindo fortemente na prevenção de desvios operacionais, aprimorando métodos de manutenção preventiva e trazendo para sua realidade a manutenção preditiva como uma forte aliada na direção deste objetivo.

Com isto, este trabalho pretende viabilizar a incorporação de um novo método de monitoramento, que resulte, juntamente com os métodos já implementados, em uma maior disponibilidade dos equipamentos. Assim, optou-se por um trabalho que, unindo inovação tecnológica e desafios acadêmicos, busca acima de tudo, uma maior operacionalidade do sistema.

O primeiro passo foi a escolha do equipamento que será o foco deste estudo. Após algumas considerações, decidiu-se que o sistema escolhido para este estudo será o material rodante (trem), devido a sua diversidade de equipamentos e possibilidades, sendo que, um dos equipamentos mais críticos é o motor elétrico.

Presentes em vários subsistemas como suprimento de ar, ventilação e propulsão, os motores elétricos representam um item de grande importância no

desempenho do sistema Material Rodante, sendo responsáveis principalmente pela movimentação das composições. Verifica-se também que os motores elétricos das frotas de trens mais antigas são, em sua totalidade, motores de corrente contínua, cuja manutenção é onerosa e demanda maior tempo.

Motores CC (principalmente os de grandes potências) são muito utilizados na indústria. Tanto ou mais do que em tração elétrica. Porém, em aplicações industriais o monitoramento é mais simples, pois se tem acesso imediato às máquinas. Por conta disso, a detecção, o diagnóstico de falhas e o monitoramento contínuo da operação desses motores CC não foram objetos ainda, de grande investimento por parte de cientistas e engenheiros, da forma como acontece com os motores de indução.

De qualquer maneira, espera-se como resultado do monitoramento contínuo dos motores CC um diagnóstico detalhado do seu comportamento elétrico e mecânico e ainda, que os possíveis defeitos possam ser precisamente detectados e localizados antecipadamente.

Para justificar seu investimento, um sistema de monitoramento contínuo deve ser capaz de fornecer diagnósticos em tempo real, através da medição de sinais de fácil aquisição e compreensão, com a utilização de sensores de mercado objetivando-se baixos custos e rápida implementação.

Diante deste cenário, levando-se em consideração a análise das ocorrências operacionais, verifica-se que o sistema de propulsão dos trens se mostra um item de grande relevância, sendo responsável por 26% do total de falhas conforme dados dos anos de 2005 e 2006. Além disto, falhas neste sistema têm como consequência, na maioria dos casos, a retirada imediata do trem da Operação Comercial.

O motor de tração, considerado o principal componente deste sistema, tem preço elevado, manutenção onerosa e exige mão de obra especializada para a detecção de falhas.

Diante deste cenário o motor de tração foi escolhido como objeto deste estudo.

2 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DEFEITOS

Embora as máquinas rotativas sejam usualmente bem construídas e robustas, a possibilidade de defeitos incipientes é inerente. Defeitos incipientes dentro das máquinas geralmente afetam o seu desempenho antes mesmo que falhas significativas ocorram. A detecção de defeitos quando estes estão ainda em fase de desenvolvimento, possibilita ao engenheiro de manutenção planejar uma ação corretiva com relação ao defeito previsto, bem antes que este ocorra.

Se os defeitos incipientes ou a deterioração gradual não forem detectados, poderão provocar a quebra do motor causando prejuízos e transtornos. Várias falhas podem ser evitadas se a aplicação, condição de trabalho e origem das falhas forem compreendidos.

Apesar do reduzido número de trabalhos publicados (se compararmos ao universo dos motores de indução), alguns métodos de detecção e diagnóstico de falhas para motores de corrente contínua já são de conhecimento do meio acadêmico.

Estes métodos podem ser classificados como métodos baseados em modelos dinâmicos, métodos baseados no conhecimento e métodos baseados na análise de sinais (LIU et al, 2000).

Primeiramente, os métodos baseados em modelos dinâmicos incluem estimativa de parâmetros, estimativa de estados, etc. Este tipo de método é capaz de detectar problemas de desempenho através do uso de instrumentos de medição convencionais, de forma não invasiva, porém, com o uso de detectores sensíveis, em sua maioria, ao ruído advindo de outros equipamentos. Entretanto, o seu maior inconveniente é que, para se conseguir um diagnóstico preciso, os dados de entrada

e saída do motor devem ser comparados a modelos algébricos que tem por finalidade representar o comportamento de um motor convencional "saudável". Estes modelos não são de fácil desenvolvimento e demandam, indiscutivelmente, muito investimento de pesquisa (LIU et al, 2000).

Métodos baseados no conhecimento incluem aqueles que utilizam lógica "fuzzy" e redes neurais. Um sistema deste tipo pode ser construído para detectar e diagnosticar falhas no motor de acordo com a experiência acumulada por um corpo de engenheiros, sendo estas detectadas e diagnosticadas pela observação do comportamento operacional da máquina. O problema com o uso deste método é que, acumular estas experiências e expressá-las como regras para intervenção não é simples, demanda tempo e é praticamente inviável para monitoramento de motores embarcados, se o objetivo é observá-los durante sua prestação de serviço (LIU et al, 2000).

Já os métodos baseados na análise de sinais incluem, por exemplo, análise de vibração, análise de corrente, etc. (LIU et al, 2000).

Estes métodos fazem uso de modelos de sinais, com espectros, correlação de funções ou ainda, a análise das medidas de sinais diretamente. Portanto, problemas nas condições operacionais dos motores podem ser extraídos e usados para detecção e diagnóstico das falhas dos motores. A grande vantagem deste tipo de método é que modelos algébricos precisos podem ser evitados (LIU et al, 2000).

O método de análise de vibração, já utilizado pelo Metrô de SP, é muito efetivo, porém reproduzir as condições normais de trabalho torna-se inviável, pois é necessário adequar a colocação dos sensores no motor e excluir possíveis vibrações externas para analisar o resultado de forma correta. O equipamento de análise é bastante complexo, de alto custo e de difícil instalação em uma frota de veículos para atendimento da demanda operacional. Trata-se de um forte aliado no

processo de manutenção preventiva, mas envolve a parada do trem para realização das medições. Por conta desta dificuldade e do alto custo dos sensores, este método é utilizado em monitoramento contínuo apenas em alguns casos específicos, porém com a desvantagem da fixação dos sensores no motor.

3 OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO

O presente trabalho tem por objetivo estudar e analisar a corrente elétrica consumida pelos motores de tração embarcados nos trens do Metrô de São Paulo, buscando encontrar, através da comparação das medições realizadas, uma analogia entre o espectro de frequência da corrente elétrica e o respectivo estado do motor. Esta analogia será realizada comparando-se as medidas obtidas em motores saudáveis com as medidas em motores que estão em acompanhamento devido à problemas detectados através da análise de vibração.

Este desenvolvimento está, portanto, embasando-se no método de análise de sinais.

A motivação foi vislumbrar a possibilidade futura da implementação de um sistema de monitoramento em tempo real que aumente ainda mais a disponibilidade dos equipamentos, uma vez que este acompanhamento seria realizado durante a prestação de serviço dos trens, dentro do horário comercial.

4 MOTOR DE TRAÇÃO DO SISTEMA METROVIÁRIO

Os trens do Metrô de São Paulo são projetados para atingir os seguintes requisitos específicos de serviço de tração em transporte de massa:

- Aceleração máxima 1,12 m/seg²
- Desaceleração máxima 1,2 m/seg²
- Desaceleração de emergência 1,5 m/seg²
- Velocidade máxima 100 km/h

Considerando-se o peso do carro acrescido do carregamento máximo, o trem possui sistema de tração em todos os seis carros, com um motor para cada eixo.

4.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Os motores de tração, que são controlados por um sistema "*chopper*", operam como geradores durante a frenagem dos carros. São motores de corrente contínua com excitação tipo série, com quatro pólos principais e quatro interpolos. Sua armadura, com quatro circuitos, é dotada de enrolamento equalizador, e seu comutador tem 136 segmentos de cobre para assegurar a capacidade de comutação do motor durante frenagens dinâmicas. Os terminais das bobinas de armadura são soldados às bandeiras do comutador pelo processo TIG ("*Tungsten Inert Gas*") o que garante uma conexão muito robusta e imune a elevadas temperaturas de operação.

A armadura é suportada no lado do comutador por um rolamento de esferas, e por um rolamento de rolos no lado do acoplamento, e pode ser removida da carcaça com ambos os conjuntos de mancais intactos. O estator tem todas suas conexões brazadas para máxima confiabilidade. A tampa frontal do motor, no lado do comutador, é soldada à carcaça de chapa de aço calandrada, assegurando excelente estabilidade mecânica, e permitindo fácil acesso aos porta-escovas.

Os porta-escovas, montados rigidamente na tampa frontal, são projetados para minimizar a movimentação das escovas causada por vibrações externas, mas permitem que ajustes sejam facilmente realizados. O motor é dotado de um ventilador montado na armadura do lado do acoplamento. O ventilador é balanceado independentemente da armadura, para assegurar sua intercambiabilidade entre os motores.

As bobinas de armadura, de campo e de interpolos, são isoladas com materiais de classe H. A armadura e o estator são impregnados sob vácuo e pressão com resina classe H isenta de solventes, assegurando alta condutividade térmica. Bandagens de fibra de vidro são aplicadas em ambas as extremidades da armadura.

Os motores estão dispostos em dois ramos paralelos, tendo cada ramo dois motores em série. Todos os motores de tração são mecânica e geometricamente intercambiáveis entre os veículos.

Os motores da série 1462A fabricados pela Villares Welco, instalados nos trens da frota da Linha 1-Azul possuem potência nominal de 170 HP, tensão nominal de 300 V e corrente nominal de 475 A.

As figuras 1 e 2 ilustram o motor de tração e o seu acoplamento ao sistema propulsor.

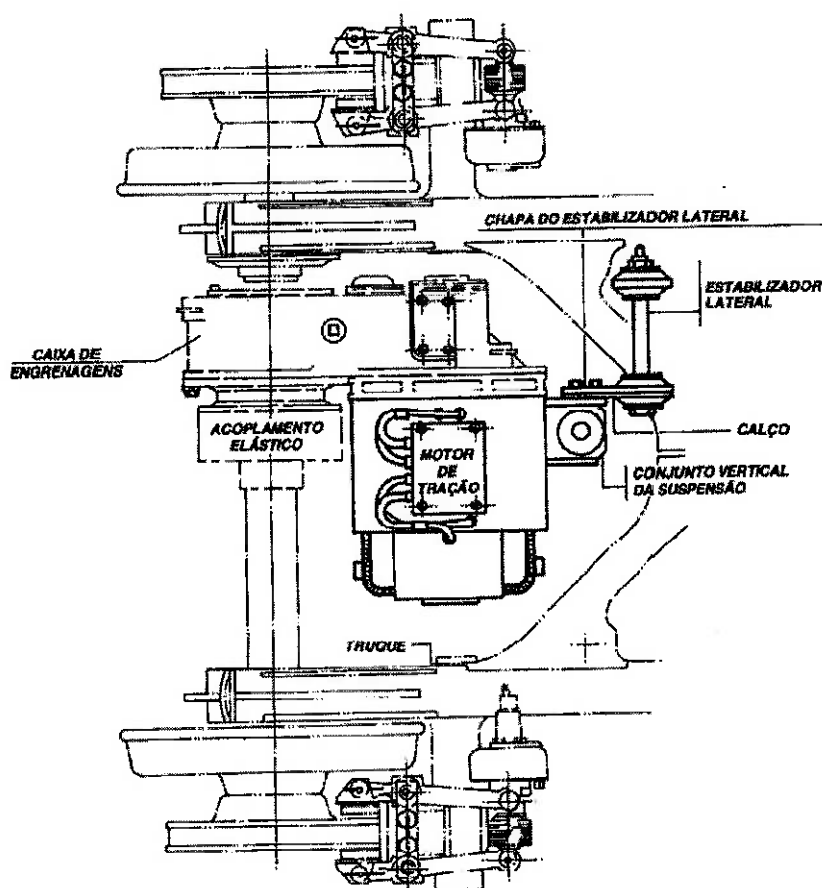


Figura 1 – Esquema de Montagem do Motor ao Truque - Fonte Manual GEVISA

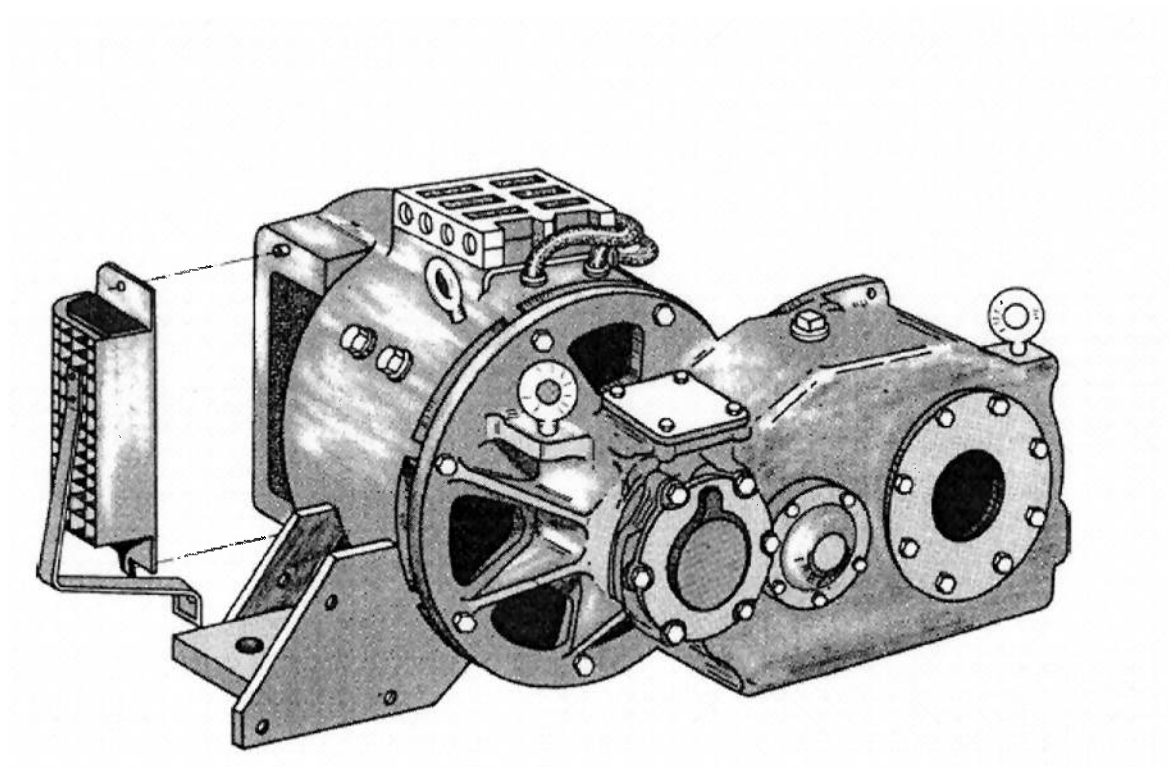


Figura 2 - Vista Geral do Motor e Caixa de Engrenagens - Fonte Manual GEVISA

4.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O motor de tração é um conversor eletromecânico de energia que, no modo de propulsão, transforma a energia elétrica, recebida da linha através do "*chopper*" - recortador, em energia mecânica, que impulsiona o veículo de acordo com as necessidades de aceleração e condições de carga do mesmo. Em frenagem, o motor de tração transforma a energia mecânica do veículo em energia elétrica que, através do "*chopper*", será dissipada nos resistores de frenagem ou devolvida à linha.

A transmissão de energia entre o motor de tração e o eixo do rodeiro é realizada através da caixa de engrenagens neles acoplada, com uma relação de redução de 7,307:1. Cada truque é dotado de dois eixos e cada veículo é dotado de dois truques, portanto um total de quatro motores de tração é utilizado em cada veículo. Os quatro motores são controlados por um único "*chopper*", que controla o chaveamento da tensão de entrada para acioná-los, com rotação máxima de 5400 RPM, potência nominal de 170 HP e tensão nominal de 300 Vcc. Contatores de manobra, relés de comando e proteção e sensores diversos, completam o sistema.

Um motor usa o fenômeno eletromagnético da ação de um fluxo sobre a corrente elétrica (não há necessidade de contato físico para gerar a força). A ação aumenta na mesma proporção das duas grandezas envolvidas.

É sabido que o progresso feito no campo dos motores de tração durante as últimas décadas tem sido considerável. A potência unitária continua a aumentar, assim como faz a relação potência-peso, além de uma melhora constante na confiabilidade.

4.3 LEVANTAMENTO DOS DADOS – TIPOS DE OCORRÊNCIA

Em levantamento realizado tendo como base as ocorrências apontadas durante os anos de 2005 e 2006, as falhas encontradas nos motores estão descritas abaixo, conforme tabela 1 e figura 3:

Descrição do Defeito	Quantidade	%
Comutador excêntrico	284	29,01%
Ruído anormal	139	14,20%
Rolamento defeituoso	118	12,05%
Carbonizado	113	11,54%
Lâmina comutador com defeito	92	9,40%
Baixa isolamento	71	7,25%
Trincado	61	6,23%
Mica alta	27	2,76%
Colarinho defeituoso	25	2,55%
Bandagem defeituosa	17	1,74%
Cabo defeituoso	10	1,02%
Labirinto entupido	8	0,82%
Isolação colarinho rompida	6	0,61%
Rosca defeituosa - fixação	4	0,41%
Travado	4	0,41%
TOTAL:	979	100,00%

Tabela 1 - Falhas Motores de Tração - 2005 e 2006

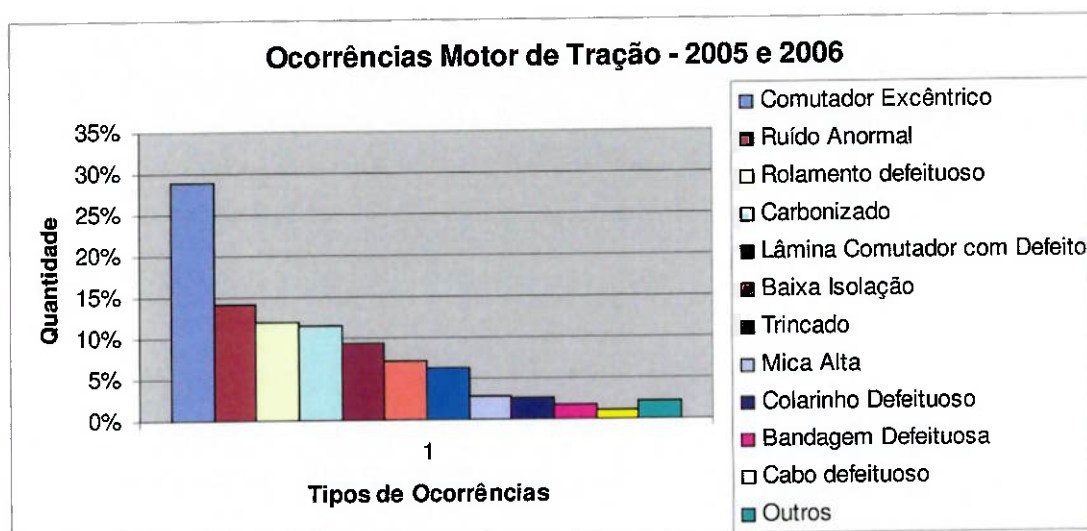


Figura 3 – Distribuição das Ocorrências no Motor de Tração – anos 2005 e 2006.

4.3.1 Comutador excêntrico

Embora a superfície do comutador esteja lisa, ele pode estar fora de centro. Esse é um defeito comum, sendo geralmente, devido à alteração de superfície por aquecimento ou por deficiência na retenção mecânica dos segmentos. Esta excentricidade é compensada pelas escovas limitando-se a subir e descer nos porta-escovas, em cada rotação. Porém, esse movimento excêntrico torna-se mais rápido na medida em que a velocidade aumenta. Finalmente, as escovas passam a não fazer contato, acabando por queimar a superfície do comutador. A continuação dessa queima causa deterioração ainda maior na superfície do comutador.

As possíveis causas de excentricidade no comutador podem ser devido ao eixo empenado, mancais desalinhados, comutador usinado entre centros

desalinhados ou deformação causada por grandes alterações de temperatura a altas velocidades.

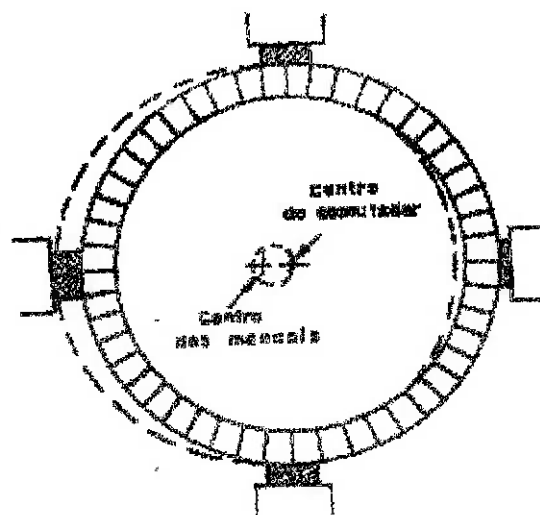


Figura 4 – Comutador Excêntrico – detalhe ilustrativo.

4.3.2 Ruído anormal

Ruídos indesejados costumam indicar problemas como má lubrificação, defeitos no rolamento, etc. O primeiro passo é identificar se o ruído anormal provém do motor ou do conjunto redutor/rodeiro.

As principais fontes de ruído no motor de tração são mancais de rolamento danificados e desbalanceamento do rotor. Casos mais raros pode ser atrito e/ou choques entre escova e comutador devido à excentricidade do coletor, lote de escovas com superfície mais abrasiva que o normal ou dificuldade para formar o filme entre escova e coletor ou lâminas saltadas, mas também é possível que o ruído seja proveniente do ventilador do motor.

4.3.3 Rolamento defeituoso

As causas mais comuns de defeitos em rolamentos são: sobrecarga, defeito de fabricação, desalinhamento, lubrificação inadequada, excessiva ou ineficiente, falha de vedação e descargas elétricas através dos mancais.

Geralmente, os defeitos em rolamentos evoluem com certa lentidão e emitem sinais com bastante antecedência da falha final, que pode ocorrer por travamento ou ruptura dos componentes. Defeitos típicos que evoluem desta forma são: riscos nas pistas, roletes ou esferas, "*pitting*", trincas, corrosão, erosão e contaminação.

As frequências características de falhas de rolamentos possuem uma peculiaridade especial: elas são não-síncronas, isto é, não são múltiplas inteiras da velocidade de rotação do eixo. Isto pode permitir a sua identificação, mesmo quando não se conhece qual rolamento instalado na máquina monitorada. (Ponci e Cunha et al., 2005)

4.3.4 Carbonizado

Refere-se à ocorrência de arcos voltaicos resultantes da descarga entre os porta-escovas e ou coletor para os pára-raios. Também se refere aos arcos generalizados ao longo da periferia do comutador também conhecidos como "*flashovers*".

4.3.5 Lâmina do comutador com defeito.

Esta falha é causada por desnivelamentos da superfície do comutador ou por barras do comutador salientes.

4.3.5.1 Desnivelamentos da superfície

Por vezes surgem desnivelamentos acentuados ou degraus na superfície dos comutadores. Tais defeitos podem ser causados por choques ou pancadas no comutador, mesmo que a alteração na superfície possa ser pequena, nenhuma mola, por mais forte que seja, pode manter a escova em contato com o rebaixo na superfície. A escova pode pular do nível mais alto ou, se a rotação for invertida, o degrau pode bater nas escovas e expulsá-las da superfície. À velocidades maiores, esta pancada pode ser bastante forte para fragmentar as escovas.

As teclas rebaixadas são discerníveis, em forma prática, pelo ruído característico, produzido em baixas velocidades e pelo escurecimento da superfície do comutador na seção baixa. É raro que apenas uma barra caia abaixo da superfície, mas, quando isto ocorre, normalmente, uma seção inteira será afetada.

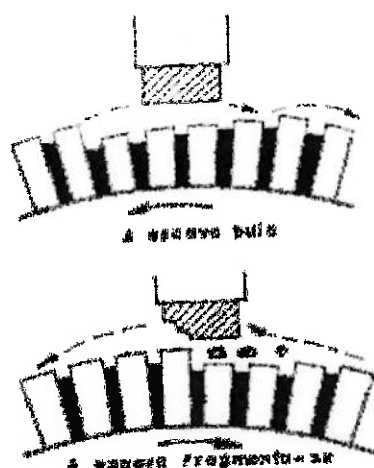


Figura 5 – Lâmina do Comutador defeituosa – Desnivelamentos da superfície detalhe ilustrativo.

4.3.5.2 Barras salientes

Se o motor for mantido parado com a alimentação ligada, as barras do comutador situadas debaixo das escovas serão superaquecidas: tais barras dilatam-se e levantam-se em relação às outras. As barras salientes batem nas escovas produzindo faiscamento e queima, agravando ainda mais a superfície do comutador. Se isso não for corrigido, as escovas acabarão por despedaçar-se e haverá faiscamento grave.

Nos casos mais graves, a temperatura pode aumentar até o ponto de recozer ou destemperar o cobre. A pré-cinta de mica poderá mesmo ser queimada. Flocos de mica serão expulsos dos pontos de maior pressão, afrouxando a ação de aperto das barras aquecidas. Os comutadores nessas condições criam muitos

problemas. As barras amolecidas desgastam-se de maneira diferente das barras adjacentes, por estarem soltas, serão levantadas em velocidades mais altas.

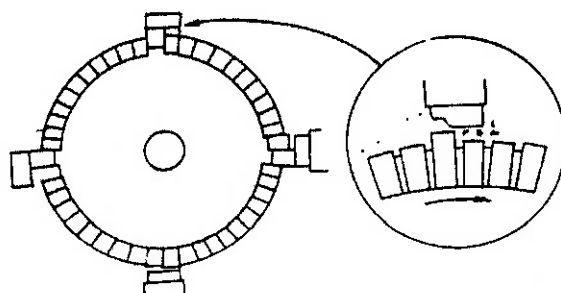


Figura 6 - Lâmina do Comutador defeituosa – Barras Salientes – detalhe ilustrativo.

Por outro lado, quando um comutador apresenta teclas altas, isto é imediatamente observável às baixas velocidades (durante partida ou parada) por um ruído característico quando o ponto alto toca cada conjunto de escovas. Este ruído normalmente é acompanhado, se a máquina estiver sob tensão, por uma centelha mecânica que passa sucessivamente em torno do comutador, ou seja, sucessivamente em cada conjunto de escovas. Se a máquina for operada por certo período após o surgimento da tecla alta, aparecerá um ponto negro no comutador onde ela se localiza, devido a um contato pobre ou ao arqueamento quando as escovas saltam da superfície.

A saliência da tecla, também pode ser resultado de um ponto macio na mica do cone ou do anel que permite que ela se eleve do local devido à força centrífuga. O número de teclas salientes dependerá da extensão deste ponto macio na mica. Às vezes os parafusos do comutador (os quais seguram os anéis em seus devidos

lugares) são puxados para cima com tal força que quebram a tecla na sede cônica. Naturalmente, isso é válido para certo número de teclas sob a influência do parafuso. O rompimento de uma das extremidades do comutador só dá evidência de ter barras altas. Em casos de esforços em demasia sobre os parafusos do comutador, (especialmente nos de maior comprimento), onde o cone não quebra, toda a seção central do comutador pode empenar enquanto as extremidades permanecem no lugar ou caem ligeiramente. A força centrífuga produzida quando a máquina está com excesso de velocidade, também pode provocar teclas salientes.

4.3.6 Baixa isolação

A resistência de isolamento é a medida da dificuldade oferecida à passagem de corrente pelos materiais isolantes. Os seus valores se alteram com a umidade e com a sujeira, constituindo-se, portanto, em uma boa indicação da deterioração dos motores.

Deve-se observar, entretanto, que o resultado dessa medida não constitui critério para a aprovação ou rejeição do motor. Dessa forma, pelas suas características, constata-se que é bastante útil para a verificação de curtos-circuitos francos, ficando a identificação de defeitos menos pronunciados a cargo de outros ensaios.

As falhas de isolação ou isolamento ocorrem quando o material isolante se desintegra, carboniza ou apresenta rachaduras, tornando-se inútil. Em geral, estas condições ocorrem devido à sobre-temperaturas.

A manifestação típica da ocorrência de falha no isolamento é o surgimento de curtos-circuitos internos ou uma falha à terra, seguida do surgimento de fumaça, altas temperaturas e intenso faiscamento no comutador. A medida de isolamento é feita aplicando-se tensão entre os terminais dos enrolamentos e a carcaça (ponto aterrado) sendo que, o valor mínimo utilizado para manutenção dos motores de tração da frota é 20 MΩ.

4.3.7 Trincado

Refere-se à trinca na base do comutador, o que acarreta a soltura dos rabos de andorinha das lâminas, que acabam subindo.

4.3.8 Mica alta

A expressão mica alta refere-se à relação da altura entre a superfície da mica e a superfície das barras do comutador.

Em operação normal, a superfície do comutador desgasta-se gradativamente. Na medida em que o cobre é removido por desgaste, a profundidade do rebaixamento (ranhuras) aumenta até que as bordas das micas fiquem niveladas (ou levemente mais altas) com a superfície do comutador. Nesse ponto, diz-se que a mica é saliente ou está alta.

A mica alta pode ser o resultado de desgaste eletromecânico normal ou de uma falha no seu rebaixamento após as operações de retificação do comutador. A formação de saliência dos segmentos de mica nas arestas, junto à superfície do comutador, resulta do rebaixamento incorreto da mica saliente.

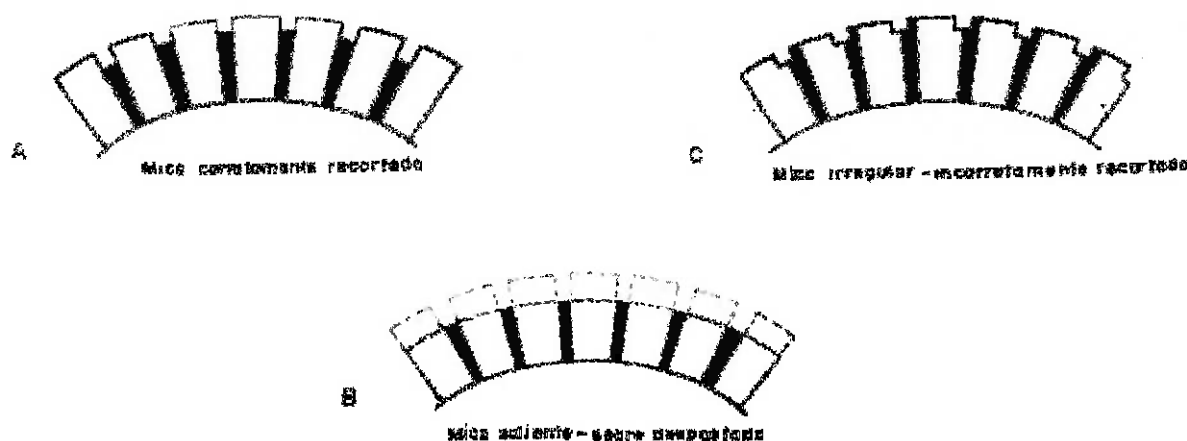


Figura 7 – Mica Alta – detalhe ilustrativo.

Qualquer que seja a forma da mica saliente ela perturba o processo da comutação. Tal perturbação, por sua vez, aumenta o desgaste das teclas do comutador e o desgaste das escovas, o que irá expor mais mica e, em consequência, aumentam os efeitos perniciosos sobre a comutação.

Em outras palavras, esse fato se traduz no centelhamento sob as escovas e na queima e escurecimento de todas as teclas. Esse centelhamento normalmente é acompanhado por um anel de fogo envolvendo o comutador, resultando no curto-circuito das teclas por partículas das escovas desgastadas pela mica alta.

O anel de fogo, em princípio, não é sério, mas, gradualmente, fica pior. Isso pode fazer a máquina centelhar de porta-escovas a porta-escovas, causando sério

dano ao comutador e às próprias escovas. O escurecimento de todas as teclas começa na borda de saída e gradualmente se desenvolve até que a superfície inteira é queimada. A mica alta também é evidenciada pela trepidação das escovas e normalmente resulta do uso de escovas que não contém suficiente material abrasivo para cortar a mica na mesma taxa que o cobre.

4.3.9 Colarinho defeituoso / Isolação colarinho rompida

O colarinho é uma cobertura feita de um composto isolante revestida com verniz, que cobre o cone de mica, responsável pela isolação da extremidade do comutador.

O colarinho pode apresentar baixa isolação ou pode simplesmente quebrar ou trincar.

4.3.10 Bandagem defeituosa

A bandagem é uma cobertura feita com fitas de “*poliglass*” impregnadas, que protegem as cabeças de bobina do enrolamento do rotor.

Em determinadas situações, essa cobertura se rompe e se espalha pelo interior do motor.

4.3.11 Cabo defeituoso

Normalmente os cabos apresentam problemas de isolação ou de contato. Esse tipo de falha se refere a danos provocados aos cabos de potência que interligam os enrolamentos de campo e armadura e aqueles que ligam o motor à caixa de controle de motores e ao “*chopper*”. Os danos mais comuns são rompimentos da isolação devido a atrito com as superfícies vizinhas a seu trajeto, como por exemplo, o anel resiliente do rodeiro.

Outro tipo de falha é o sobreaquecimento na região próxima aos terminais devido a problemas com a crimpagem dos mesmos e às elevadas temperaturas produzidas pelo mau contato elétrico entre terminal e cabo. Mais raros são os problemas com a isolação elétrica dos cabos. Uma possível causa para esse tipo de problema é o ataque de agentes químicos ao material isolante, como por exemplo a graxa.

4.3.12 Labirinto entupido

Refere-se ao labirinto que se destina a conduzir lubrificante para os mancais do motor.

4.3.13 Rosca defeituosa – Fixação

Problema de ajuste mecânico na fixação do motor ao truque. Qualquer anormalidade deve ser sanada pela substituição do conjunto, com o objetivo de evitar maiores danos.

4.3.14 Travado

Esta é uma das falhas com a consequência mais crítica para a operação comercial do sistema, pois quase sempre causa o travamento do rodeiro. Quando isto ocorre, o trem é retirado do sistema com arraste das rodas implicando em risco de descarrilamento e causando calos ou saliências nas rodas e trilhos.

Pode-se citar como causas para rotor travado em motores de tração:

- Quebra do pinhão de alta no rodeiro, fazendo com que o conjunto seja deslocado para trás, travando o conjunto;
- Quebra dos mancais, o que faz com que a armadura caia sobre os pólos do estator;
- Quebra do ventilador, liberando partes ou todo o conjunto que trava na sede ou carcaça;
- Porca cônica solta que prende o colarinho. Como essa porca mantém as lâminas do comutador presas, ao se soltar, libera as teclas que devido à força centrífuga se levantam e travam nos porta-escovas;
- Afrouxamento do pacote de lâminas da armadura;

- Deformação das cabeças de bobina que vão travar na parte estática.

4.3.15 Desbalanceado - Desbalanceamento no núcleo do rotor ou eixo

O desbalanceamento pode ocorrer por diversos problemas, tais como: pequenas torções, deslocamento de enrolamentos, deslocamento de isolantes, desgastes desiguais no coletor, etc.

A principal consequência deste defeito é o aumento da vibração do motor que pode levar ainda a diversos tipos de falhas mecânicas ou elétricas.

5 METODOLOGIA

Este trabalho se propõe a fornecer uma base teórica para o desenvolvimento futuro de um sistema de monitoramento, com o objetivo de identificar possíveis falhas incipientes nos motores de tração através da análise da corrente elétrica consumida durante sua operação.

Rotineiramente, são executadas análises de vibração nos motores instalados nos trens, com o objetivo de identificar desvios em seu funcionamento. Os motores que apresentam problemas são catalogados e acompanhados pelas equipes de manutenção com objetivo de verificar a evolução do problema, programando uma atuação quando necessário. Esta atividade é descrita no anexo A.

Espera-se que motores com falha produzam perturbações na corrente elétrica que se reflita em seu espectro de frequência determinando uma assinatura própria.

A metodologia aplicada tem por objetivo determinar a assinatura da corrente elétrica de motores sem falha, compará-las à assinatura de motores com problemas já conhecidos, e que foram diagnosticados pelo método de análise de vibração.

Trata-se, portanto, de um trabalho com forte orientação experimental.

Para sua execução, foi necessário o desenvolvimento de um arranjo experimental com uma instrumentação adequada, que permitisse medir e registrar a assinatura da corrente elétrica dos motores de maneira confiável, pois não havia parâmetros de comparação para este tipo de registro, ou seja, não era possível prever como a manifestação das falhas se refletiria na corrente.

Todo o trabalho foi desenvolvido em cinco etapas e demandou aproximadamente 60 horas de experimentação considerando-se os tempos de preparação e testes. Foram realizados testes dinâmicos na linha de testes do pátio Jabaquara e testes na vala de manutenção do bloco A, totalizando 40 motores analisados.

Estas etapas são descritas a seguir.

5.1 ETAPA 1 - LINHA DE TESTE

A idéia inicial foi registrar os dados com os motores em condições reais de operação. Esta condição pode ser encontrada linha de testes do pátio de manutenção do Jabaquara.

Os primeiros dados foram capturados de um motor em regime de operação normal com ciclos de aceleração e frenagem, semelhantes àqueles encontrados durante a operação comercial.

Os motores de tração são ligados em série 2 a 2 em cada truque, portanto a corrente de alimentação registrada é aquela que circula através de ambos os motores. Cada truque possui instalado um transdutor com a finalidade de informar o valor da corrente elétrica para realimentar o circuito de controle de tração do trem.

A medição e registro da corrente elétrica do motor foram efetuados com um analisador dinâmico de sinais HP 3506A conectado diretamente à saída do transdutor de corrente existente no trem (especificações técnicas no Anexo C).

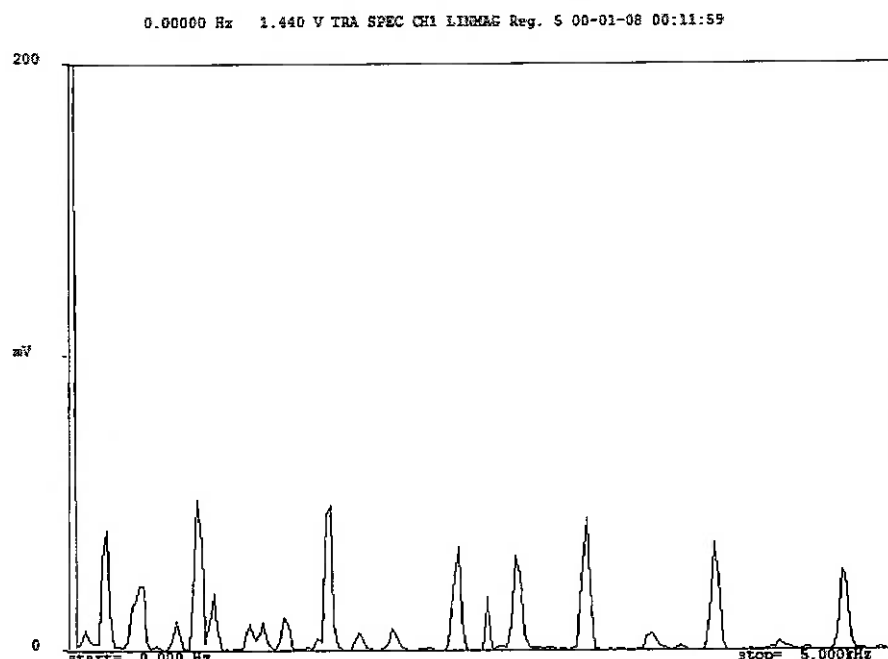


Figura 8 – Registro do trem 17 na linha de teste

Estes registros evidenciaram que existem indícios da assinatura de corrente no consumo elétrico dos motores, porém devido a variáveis como o regime de aceleração e frenagem, velocidade não constante, geometria da via, exigência de torque e conseqüente atuação do “*chopper*”, o comportamento deste sinal no analisador dinâmico se mostrou bastante instável. Além disto, há interferência de outros sinais que são adicionados ao sistema de medição de corrente para o controle de tração e também outras perturbações provenientes da alimentação da via (Figura 8).

Estas variáveis tornam o processo de investigação extremamente difícil, uma vez que os sinais que possivelmente indicam a falha não são conhecidos tanto em

amplitude como em frequência, além disto, tornam impossível qualquer analogia ou comparação entre os registros.

Desta forma, foi necessária a busca de um ambiente onde estas variáveis pudessem ser controladas, com a finalidade de obterem-se sinais de motores com o mesmo nível de exigência.

Este ambiente pode ser encontrado em um processo de manutenção preventiva realizado no trem chamado teste de giro, onde os motores e redutores são inspecionados por meio de análise de vibração.

5.2 ETAPA 2 – TESTE DE GIRO COM RETIFICADORA DE SOLDA

Foi realizado teste de giro (Anexo B), na vala de manutenção, utilizando um retificador de solda White Martins SOLDARC modelo R425, para a alimentação elétrica de um par de motores. Um dos eixos foi levantado fazendo somente um dos motores girar.

A medição e registro da corrente elétrica do motor foram efetuados com uma ponta de corrente Yokogawa 2343 04 conectada ao analisador dinâmico de sinais HP 3506A (especificações técnicas no Anexo C).

O espectro da corrente foi capturado no momento em que o motor alcançou a estabilidade, ficando em rotação constante (Figura 9).

A análise destes sinais demonstrava várias raiais de frequências múltiplas de 60 Hz, indicando que poderia haver influência do processo da retificação da fonte utilizada no teste. Esta tese foi comprovada através de testes sem a influência dos motores, utilizando-se a fonte para alimentar uma carga resistiva (Figura 10).

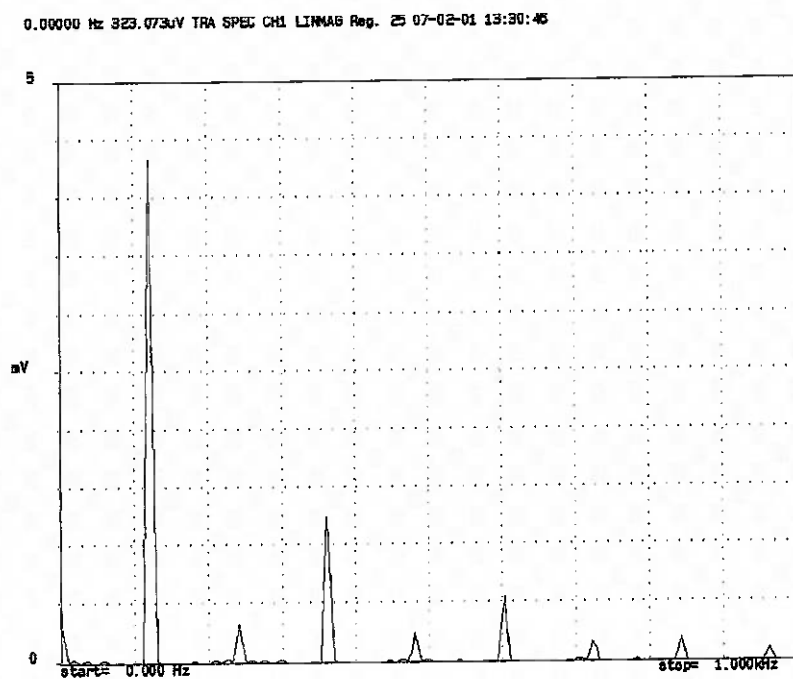


Figura 9 – Registro do trem 351 alimentado com a retificadora de solda

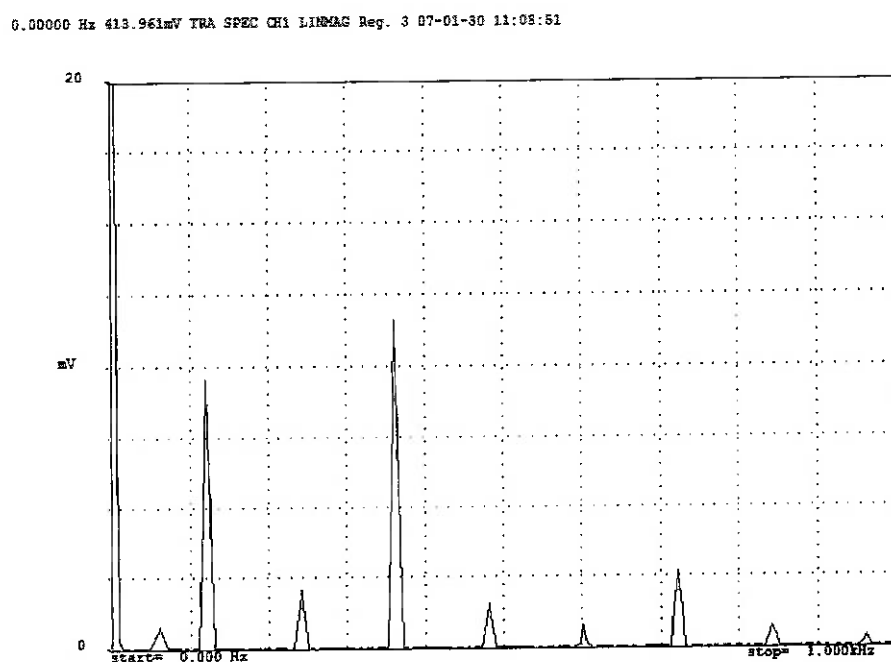


Figura 10 – Retificador de solda com carga resistiva

A presença dos sinais interferentes nos registros obtidos era extremamente indesejável, visto que os sinais que buscávamos deveriam ser oriundos exclusivamente do motor, de modo a poder comparar as características de cada registro.

Concluiu-se que a retificadora de solda não se mostrou adequada para o desenvolvimento da pesquisa. Os esforços se concentraram a partir deste momento na busca de outra fonte de tensão que não produzisse ruídos na corrente de alimentação do motor.

5.3 ETAPA 3 – TESTE DE GIRO COM FONTE DE CORRENTE CMSP

Em substituição à retificadora de solda utilizada na etapa anterior, decidiu-se utilizar uma fonte de corrente para o teste de giro.

Esta fonte foi projetada pelo Metrô de São Paulo para a realização do teste de giro com controle da rotação do motor, exigência na análise de vibração.

A medição e registro da corrente elétrica do motor foram efetuados do mesmo modo da etapa anterior, com uma ponta de corrente Yokogawa 2343 04 conectada ao analisador dinâmico de sinais HP 3506A (especificações técnicas no Anexo C).

O espectro da corrente foi capturado no momento em que o motor alcançou rotação de 1800 RPM (Figura 11).

A análise destes sinais também demonstrava várias raias de frequências múltiplas de 60 Hz indicando também que poderia haver influência do processo da retificação da fonte utilizada no teste. Esta tese também foi comprovada através de

testes sem a influência dos motores, utilizando-se a fonte para alimentar uma carga resistiva (Figura 12).

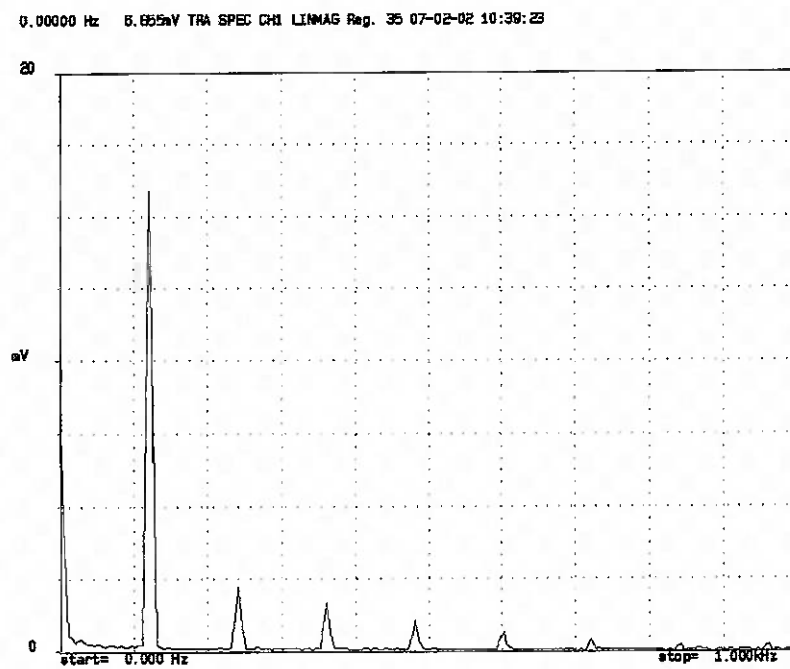


Figura 11 – Registro do trem 6 alimentado com a fonte de corrente do Metrô / motor a 250 RPM

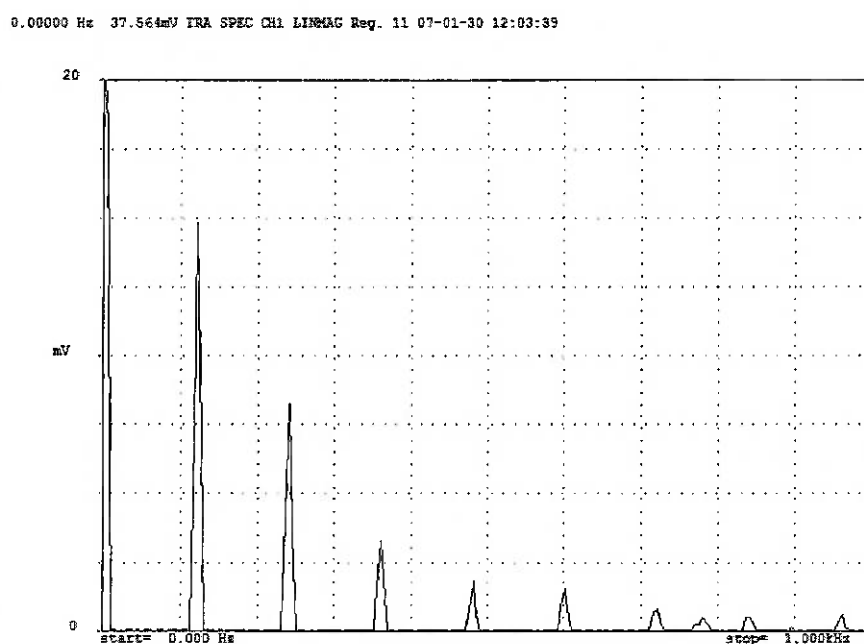


Figura 12 – Fonte Metrô com carga resistiva

Concluiu-se que a fonte do Metrô também não se mostrou adequada para o desenvolvimento da pesquisa. A partir deste momento decidiu-se realizar os testes com um banco de baterias de modo a ter uma fonte isenta de ruídos.

5.4 ETAPA 4 – TESTE DE GIRO COM BATERIA E CARGA RESISTIVA DO TREM

Para contornar o problema de interferência na corrente dos motores pela fonte, buscou-se encontrar uma fonte de energia livre destas interferências. A solução encontrada foi a utilização de um conjunto de baterias para a alimentação dos motores.

Para a especificação do arranjo de teste, consideraram-se os dados obtidos nos testes anteriores, principalmente os valores de tensão e corrente necessários

para o giro do motor em uma rotação de 1800 RPM. Portanto, utilizou-se um banco de baterias de 80 V e 180 A.h. Para garantir a limitação da corrente com a finalidade de não danificar o conjunto de baterias, foi inserido o conjunto das resistências de frenagem do trem em série com o circuito. Deste modo obtiveram-se valores de corrente e tensão próximos dos testes anteriores.

A corrente nominal em regime era de 80A, sendo que, a mesma atingia aproximadamente 140 A na partida.



Figura 13 – Montagem do circuito de alimentação – conjunto de baterias

A medição e registro da corrente elétrica do motor foram efetuados do mesmo modo da etapa anterior, com uma ponta de corrente Yokogawa 2343 04

conectada ao analisador dinâmico de sinais HP 3506A (especificações técnicas no Anexo C).

O espectro da corrente foi capturado no momento em que o motor alcançou rotação de regime, pois não havia possibilidade de controle da rotação do mesmo. Para medir a rotação do motor, utilizou-se o mesmo equipamento da fonte de corrente do Metrô de São Paulo (Figura 14).

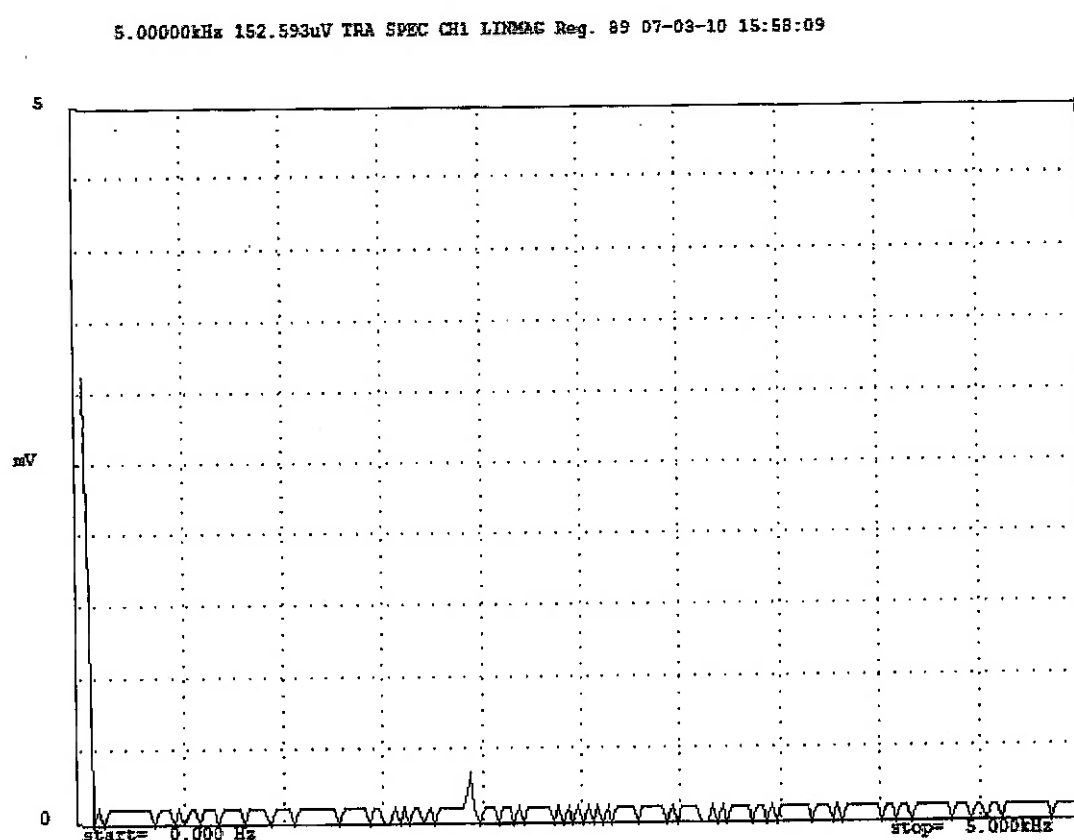


Figura 14 – Registro do trem 44 alimentado com baterias e instrumentação inadequada

Analisando-se os sinais da figura 14, observa-se que os ruídos não estão mais presentes na corrente do motor, porém o espectro de frequência estava muito

inconstante e com a amplitude muito baixa. Vários motores foram testados com esta configuração sem conseguir resultados consistentes.

Toda a instrumentação utilizada foi verificada em laboratório, realizando-se um teste de resposta em frequência. Através deste teste foi verificado que a ponta de corrente Yokogawa, apesar de conseguir medir as correntes em seu painel digital, tem uma saída para o registrador muito lenta, não conseguindo enviar devidamente os sinais para o analisador de espectro.

Buscou-se utilizar outra ponta de corrente que responde aos requisitos do teste, porém a única encontrada para tal produzia uma atenuação de 1000 vezes (Fluke 801600), acoplada a outra para produzir a saída ao analisador de sinais (Ponta de corrente Tektronix AM 503).

Como pode ser observado na figura 15, os sinais tem uma amplitude muito baixa, exigindo ampliar muito a escala do instrumento, amplificando-se também o ruído de fundo, impossibilitando a análise.

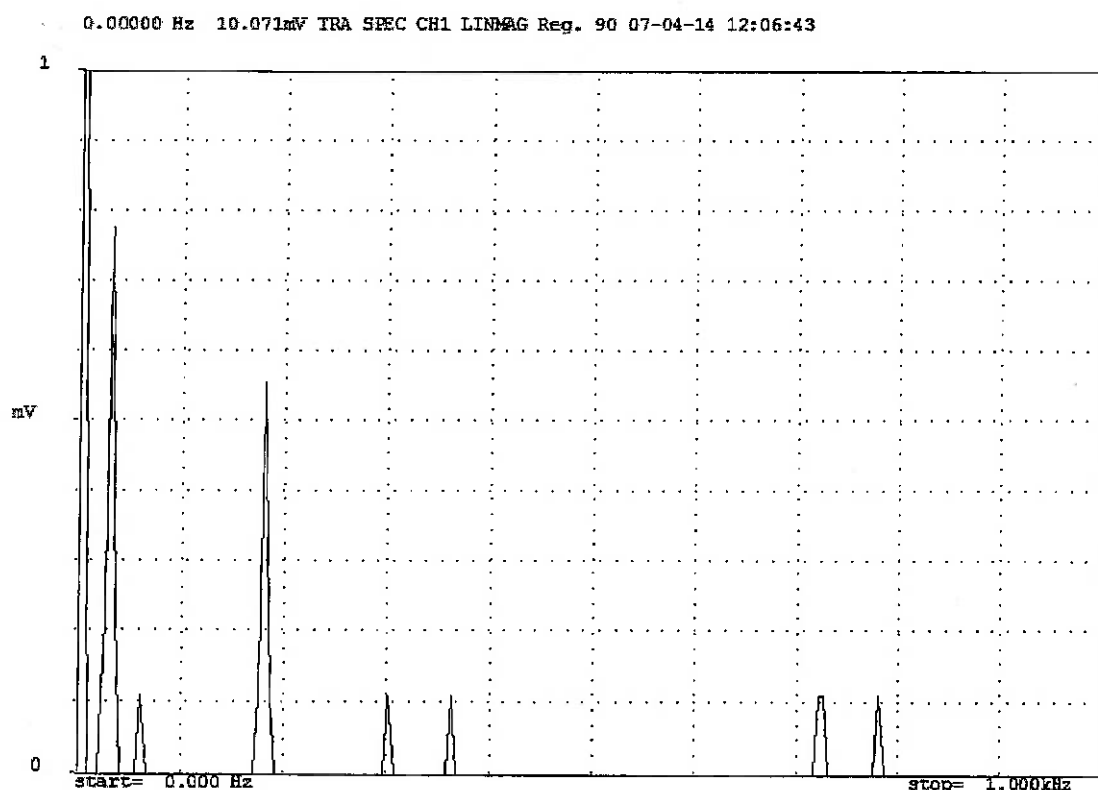


Figura 15 - Registro do trem 37 alimentado com baterias e instrumentação inadequada

Concluiu-se que a instrumentação também não se mostrou adequada para o desenvolvimento da pesquisa. A partir deste momento decidiu-se realizar os testes com uma carga resistiva externa em série com o banco de baterias de modo a efetuar medição de tensão na carga resistiva.

5.5 ETAPA 5 - TESTE DE GIRO COM BATERIA E CARGA RESISTIVA EXTERNA

A nova instrumentação se limitou ao analisador de sinais medindo a tensão da carga resistiva, além da medição da rotação do motor. Esta configuração

mostrou-se confiável, passando-se a obter registros com maior repetibilidade e imune a ruídos.

A configuração final do teste está apresentada na figura 16.

Uma vez que foi estabelecida esta metodologia que se mostrou eficaz para a instrumentação, medição e registro do espectro de frequências da corrente elétrica nos motores de tração, procedeu-se então uma seqüência de testes em motores instalados nos trens.

Os testes foram executados em 10 diferentes motores, sendo que 5 motores estavam sem falha, 3 apresentavam problemas de desbalanceamento e 2 apresentavam problemas de má lubrificação. Não foi possível testar mais motores devido à indisponibilidade de outros motores com diferentes tipos de falhas. O ideal seria criar um banco de dados mais representativo, o que pode ser efetuado com mais tempo, acompanhando-se toda a frota.

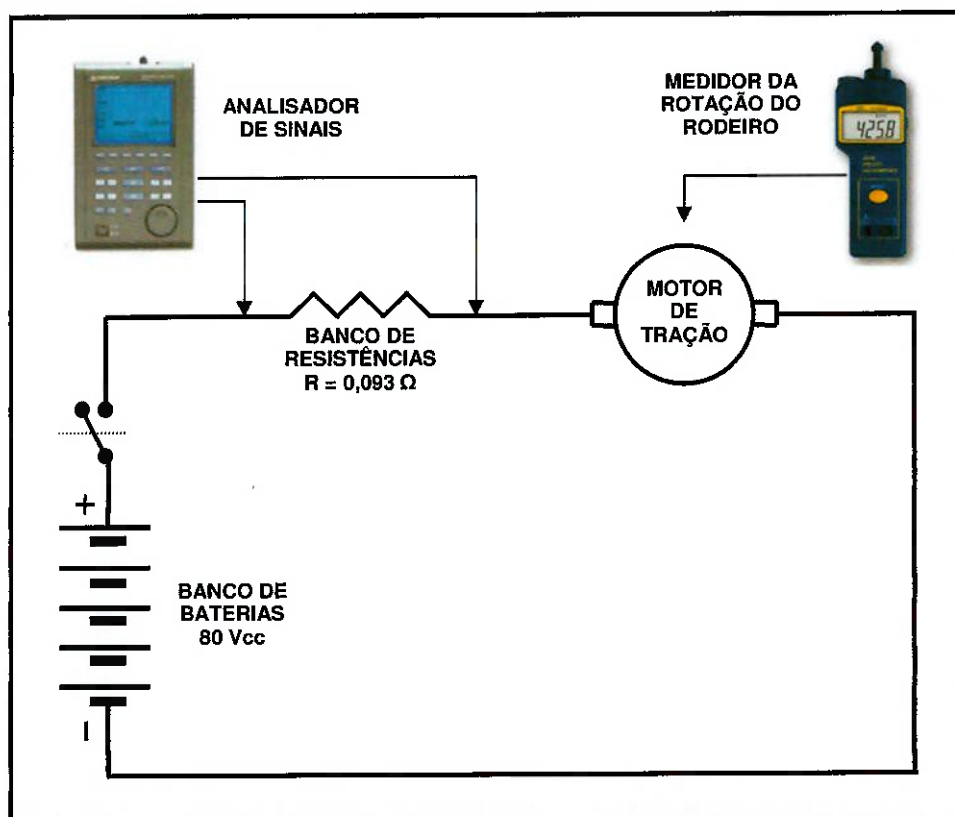


Figura 16 – Esquema elétrico da configuração final de teste

A figura 17 mostra um registro produzido com a configuração final de teste. Neste registro está marcada a rotação do motor, a escala de amplitude está corrigida para mA rms e a escala de frequência possui também uma escala normalizada em p.u. obtida através da divisão da frequência original medida no instrumento pela frequência de rotação do motor. Estas normalizações tornaram possível a comparação entre os diversos registros.

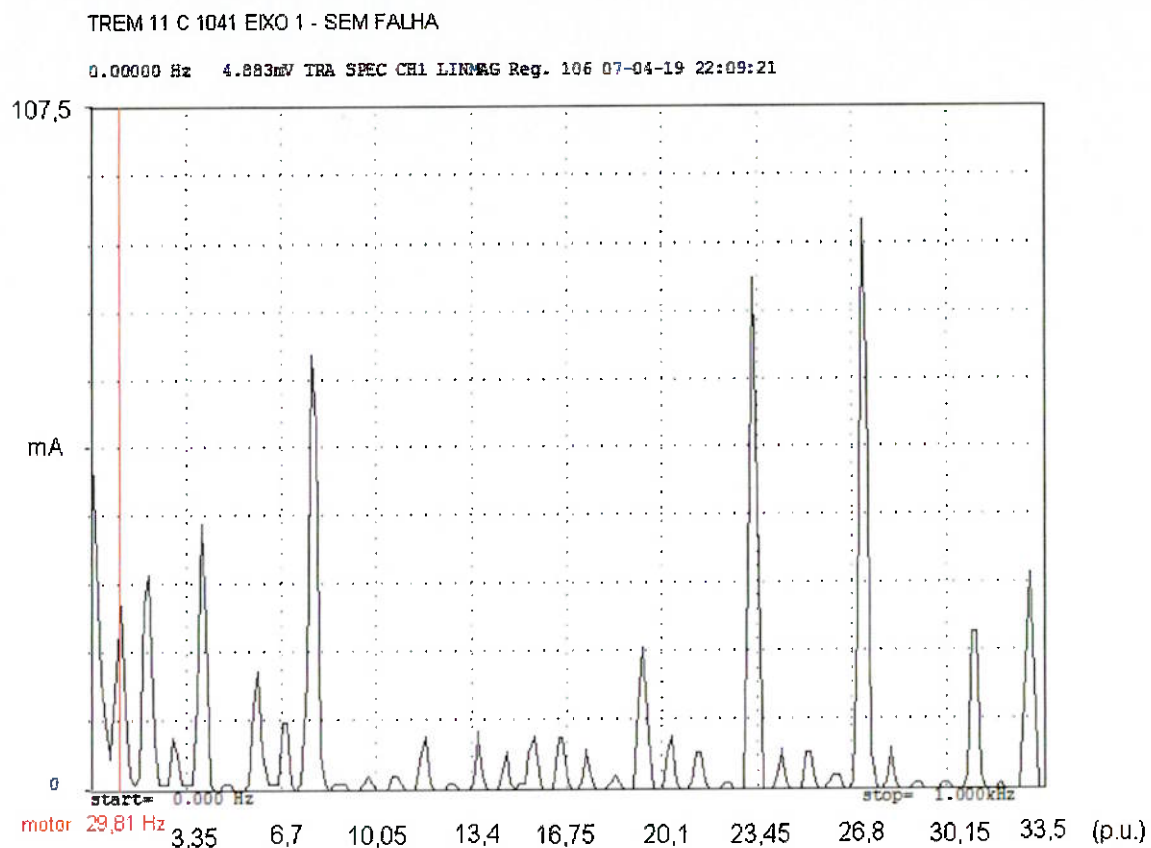


Figura 17 – Registro produzido com a instrumentação final

6 RESULTADOS

Através da comparação dos registros dos motores sem falha foi possível estabelecer um padrão da assinatura de corrente destes motores. A distribuição das harmônicas da corrente se manifesta com amplitude significativa, acima dos 40mA rms, nas raias próximas de 34 p.u., 68 p.u., 102 p.u. e 136 p.u.. Este comportamento pode ser explicado devido ao número de lâminas do comutador, que possui 136 lâminas e também pelo número de conjunto de escovas em número de 4, como pode ser observado na figura 18.

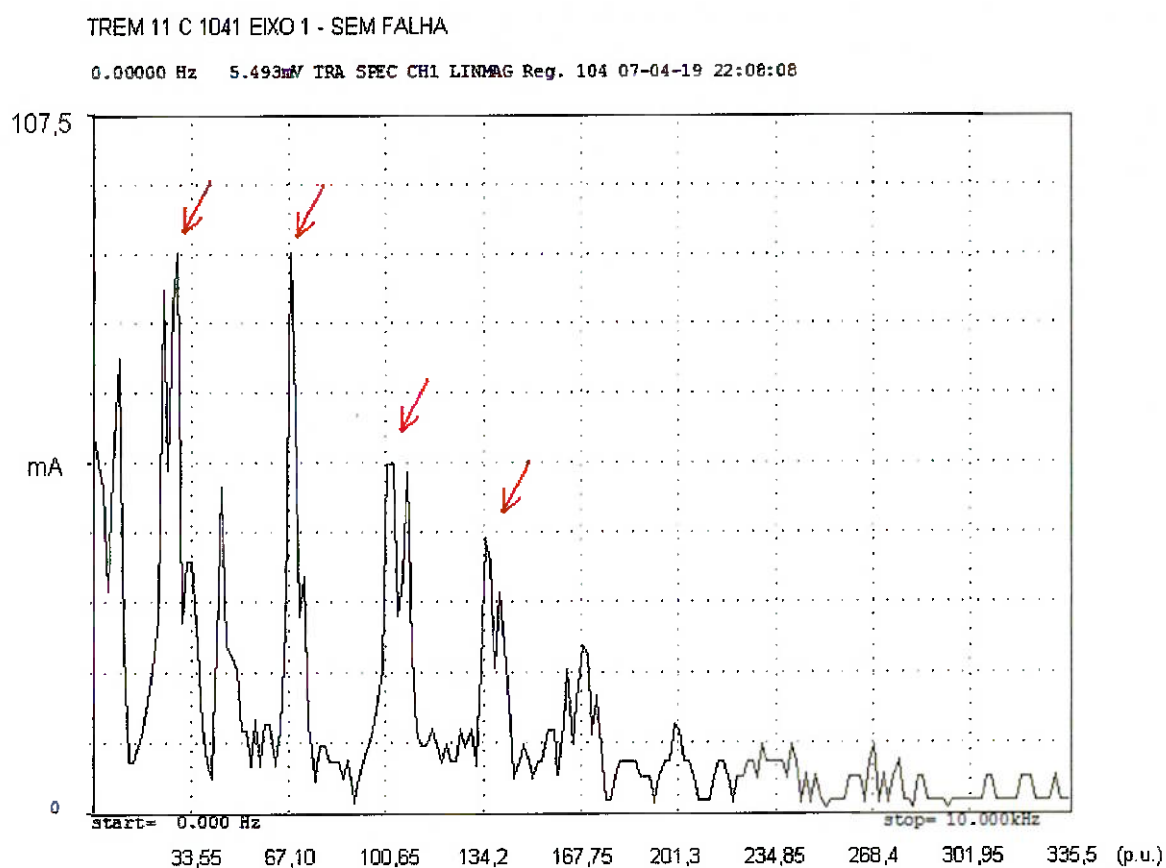


Figura 18 – Assinatura de corrente de um motor sem falha

A partir da verificação do comportamento do motor sem falha, pode-se analisar a assinatura de corrente dos motores com falhas.

Para a falha de rotor desbalanceado, os problemas se manifestam em baixas frequências, perto da frequência de rotação do motor. As assinaturas de corrente dos motores com este tipo de falha seguiram o mesmo comportamento, diferentemente dos motores sem falha. Este comportamento pode ser observado na figura 19.

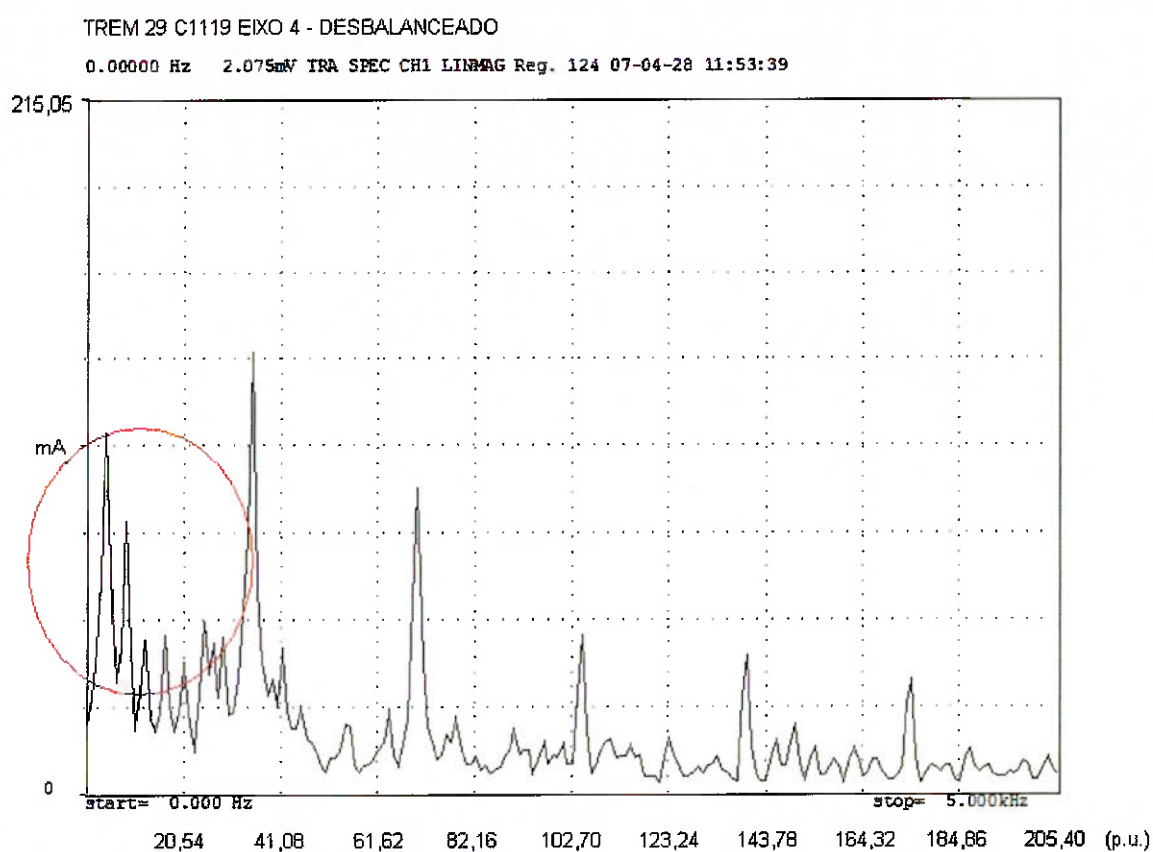


Figura 19 – Assinatura de corrente de um motor com rotor desbalanceado / 5 kHz.

A figura 20 mostra o mesmo motor com foco nas frequências mais baixas. Podem-se observar mais destacadas as raiais de 4 p.u., 8 p.u., 12 p.u., 16 p.u. e 20 p.u.. Este comportamento é coerente com o tipo de falha, pois espera-se uma perturbação perto da frequência de rotação acrescido de suas harmônicas. A única incógnita é que esperava-se que a frequência de rotação estivesse mais acentuada.

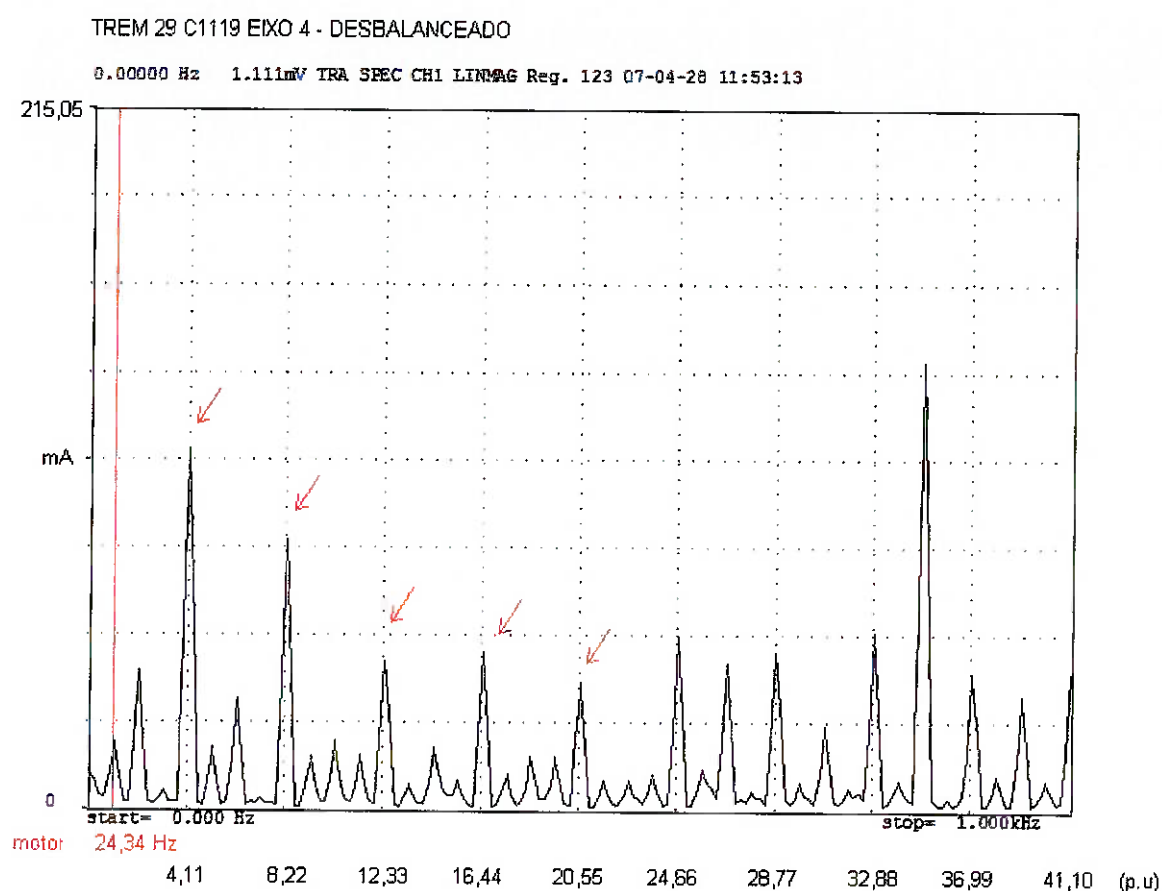


Figura 20 - Assinatura de corrente de um motor com rotor desbalanceado / 1kHz

A figura 21 mostra o resultado da análise de vibração realizado pela equipe de manutenção do metrô de São Paulo, onde pode-se observar a incidência deste tipo de falha em baixas frequências.

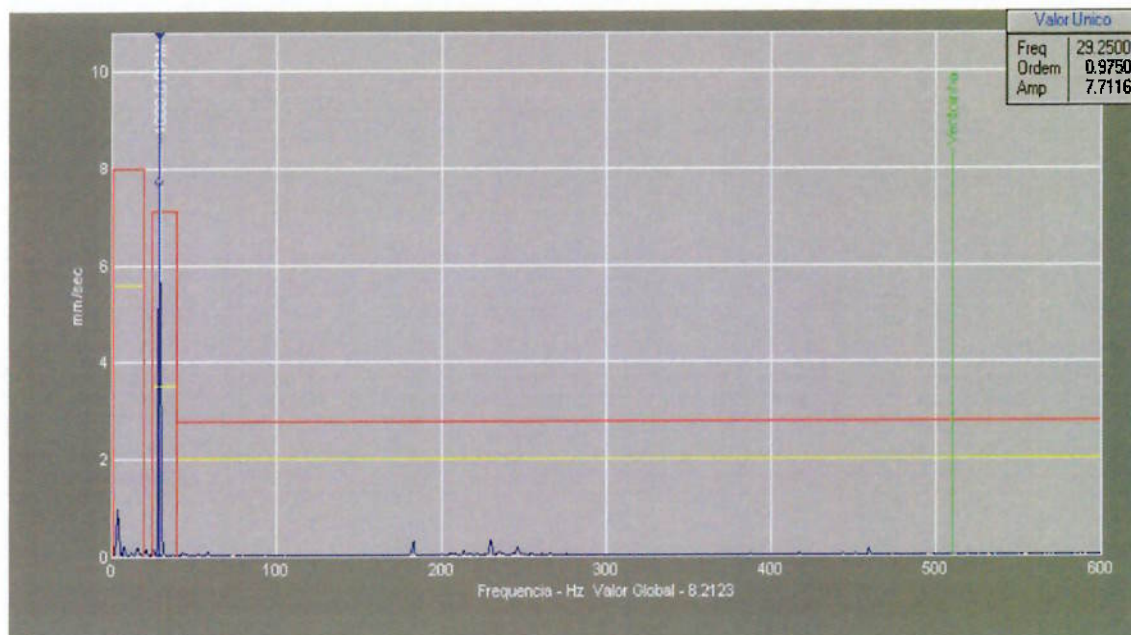


Figura 21 - Trem 11- C 1042 Pos 4- Motor 510- desbalanceado

Para a falha de má lubrificação, os problemas se manifestam em altas frequências, acima dos 150 p.u.. As assinaturas de corrente dos motores com este tipo de falha seguiram o mesmo comportamento, diferentemente dos motores sem falha. A falha descrita como má lubrificação poder ser entendida como aumento de atrito nos rolamentos, podendo provocar fissuras ou irregularidades em sua pista. Com a passagem das esferas do rolamento nestas irregularidades as perturbações ocorrem no número de irregularidades multiplicado pela rotação do motor e novamente multiplicado pelo número de esferas que o rolamento possui (oito esferas) Portanto deve-se esperar que as perturbações que ocorram na corrente elétrica sejam de frequência elevada. Este comportamento pode ser observado nas figuras 22 e 23.

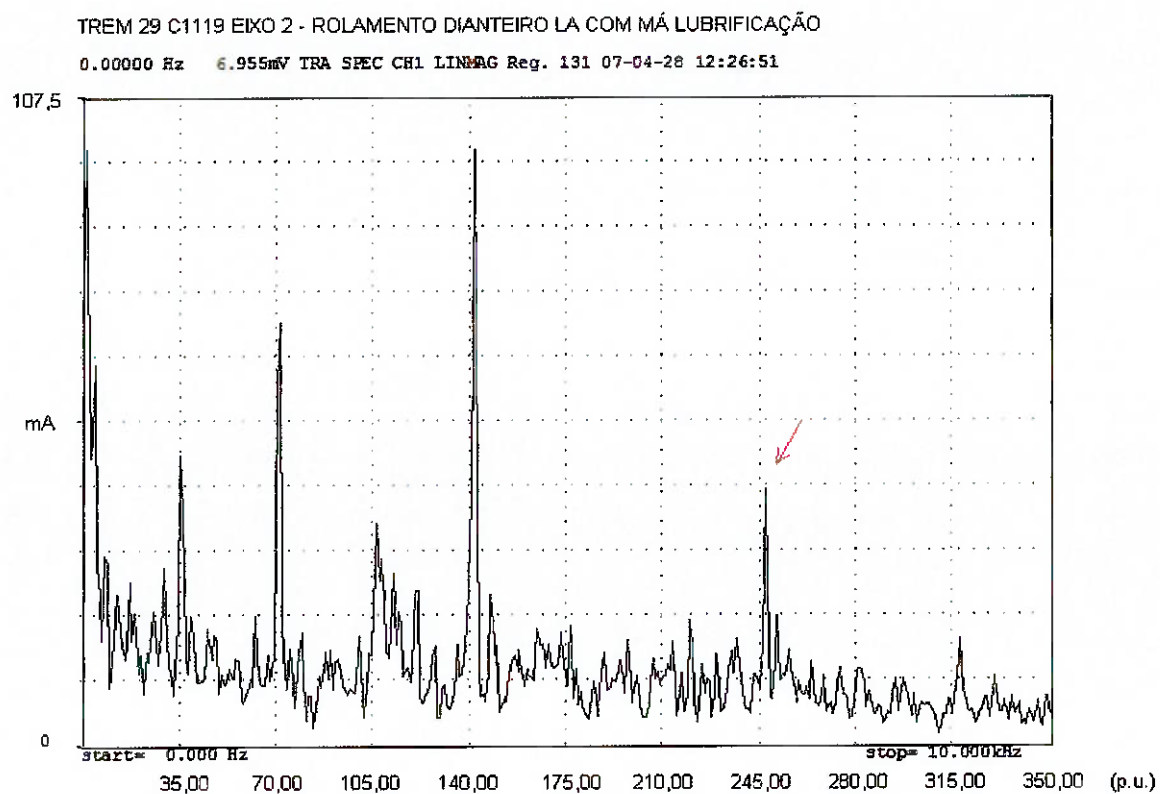


Figura 22 - Assinatura de corrente de um motor com má lubrificação / trem 29

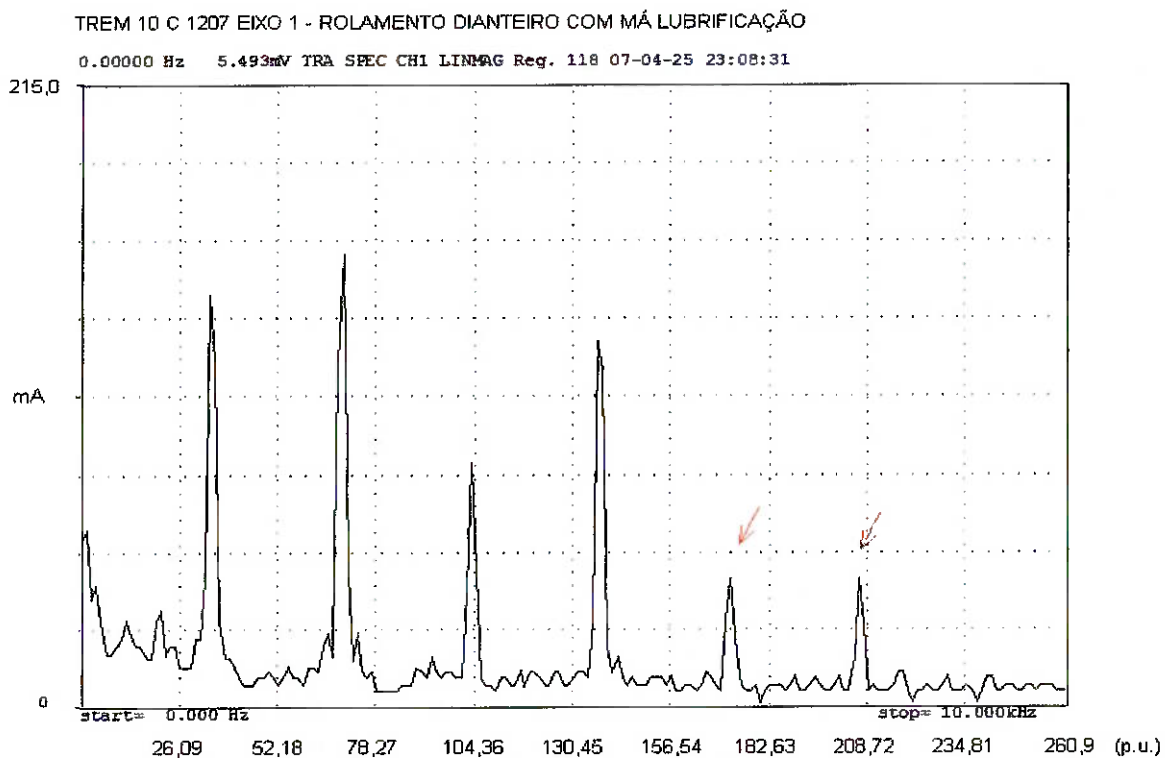


Figura 23 - Assinatura de corrente de um motor com má lubrificação / trem 10

A figura 24 mostra o resultado da análise de vibração realizado pela equipe de manutenção do metrô de São Paulo, onde pode-se observar a incidência deste tipo de falha em altas frequências.

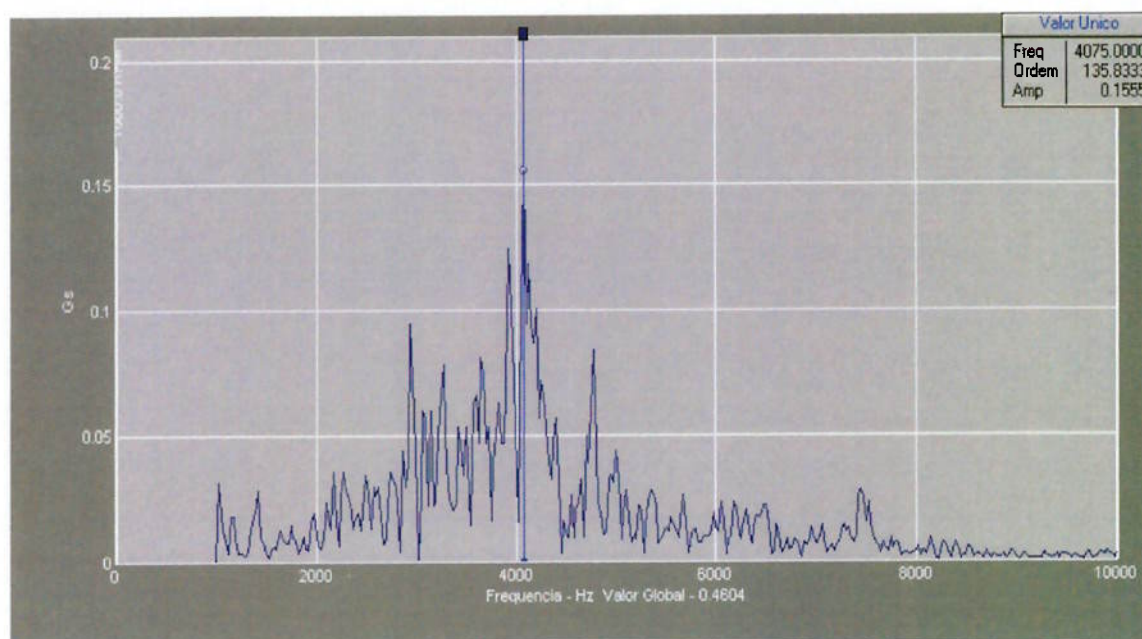


Figura 24 – Trem 29 – C1119 pos 2 – motor 49- má lubrificação

7 CONCLUSÃO

O desenvolvimento deste trabalho, fortemente orientado em experimentação, possibilitou ao grupo alcançar o objetivo inicial de comprovar que os defeitos apresentados pelos motores de tração instalados nos trens do Metrô de São Paulo afetam, de alguma forma, a corrente elétrica que circula pelos mesmos.

Infelizmente, o acompanhamento de defeitos elétricos não foi possível devido à inexistência de motores operando nestas condições, já que este tipo de defeito geralmente exige uma atuação imediata de substituição do motor para manutenção em bancada. No entanto, em função dos resultados obtidos neste estudo, presume-se que os desvios desta natureza refletem-se diretamente na corrente elétrica.

Quase a totalidade dos motores em acompanhamento pela manutenção do metrô de São Paulo possui defeitos de natureza mecânica, pois este tipo de defeito apresenta evolução lenta, sendo possível determinar através da análise de vibração o melhor momento de substituição do equipamento. O trabalho mostrou também ser possível acompanhar defeitos desta natureza através da monitoração da corrente elétrica que circula nos motores.

Apesar do baixo número de amostras (justificado pelo número restrito de motores em acompanhamento), foi possível estabelecer uma relação que se mostra bastante coerente, entre o defeito e sua respectiva assinatura de corrente.

Baseadas neste estudo, abrem-se possibilidades para o desenvolvimento futuro de novos métodos de monitoração contínua, através da análise da corrente elétrica, que poderão ser aplicados sem a necessidade de parada do equipamento.

No caso do metrô de São Paulo, o tempo de parada dos trens para efetuar manutenção é um fator crítico, uma vez que a indisponibilidade dos mesmos causa grande transtorno para a operação comercial devido à quantidade reduzida de unidades reservas face às necessidades operacionais. Um sistema de monitoração contínua pode e deve reduzir o tempo de indisponibilidade do trem.

Para isto, este estudo deve ser aprimorado, com o acompanhamento de um número maior de motores e a compreensão dos diversos tipos de defeitos, criando-se uma grande base de dados, inclusive, com a simulação de falhas elétricas. E com o desenvolvimento de novas técnicas de manutenção preditiva baseadas neste princípio, poderão ser incluídos nas especificações técnicas, para aquisição de novos trens, sistemas desta natureza.

Finalmente, este trabalho pretende dar uma contribuição para início de futuras pesquisas, pois a metodologia para medição e investigação está consideravelmente apurada.

REFERÊNCIAS

- [1] Liu, X.-Q., Zhang, H.-Y., e Yang, J. ***Fault detection and diagnosis of permanent-magnet dc motor based on parameter estimation and neural network***, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 47(5):1021-1030, oct 2000.

- [2] Ponci, L. P., e Cunha, P. M. R. ***Previsão de falha de rolamentos por análise espectral e de envelope***, 2005.

- [3] Ariza, C. F., ***Manutenção corretiva de máquinas elétricas rotativas***, ed. McGraw-Hill, 1977.

- [4] GEVISA, ***Manual de manutenção – Sistema de tração e frenagem, vol.4***, rev. fev.1997.

- [5] Brito, J. N., ***X Seminário brasileiro de manutenção preditiva e inspeção de equipamentos***

ANEXOS

ANEXO A

TESTE DE VIBRAÇÃO

Historicamente, a prática da auscultação sempre foi utilizada para realização da análise das condições de funcionamento dos redutores e motores de tração no Metrô de São Paulo. Este método consiste em se fazer um teste prático de escuta, onde se deve colocar um bastão de madeira ou a ponta da chave de fenda o mais próximo do rolamento investigado e colocar o ouvido na outra extremidade da ferramenta. Se o ruído ouvido for suave e uniforme, indica que o rolamento e o conjunto estão bons. A presença de um ruído uniforme e metálico poderia indicar falta de lubrificação. Ou seja, a presença de ruídos irregulares indicaria defeito.

A partir de 2006, o teste de vibração passou a ser utilizado como uma ferramenta capaz de identificar, com maior exatidão, a classificação do defeito apresentado, além de proporcionar um prognóstico de vida do equipamento analisado. Este teste é realizado durante a permanência do trem em teste de giro.

Neste trabalho, os resultados obtidos pelo teste de vibração serão utilizados como referência comparativa na escolha dos motores saudáveis e relação aos motores em acompanhamento.

DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE

Para esta medição, deve-se carregar a rota das medições a serem realizadas com o equipamento Microlog. Colocado o motor em movimento, impõe-se uma rotação de 250 ± 25 RPM no rodeiro a ser medida a vibração. A velocidade deverá ser tomada na roda.

Depois, posiciona-se o acelerômetro no motor de tração e mede-se a vibração. Estas medições deverão ser realizadas com a rotação do motor estabilizada.

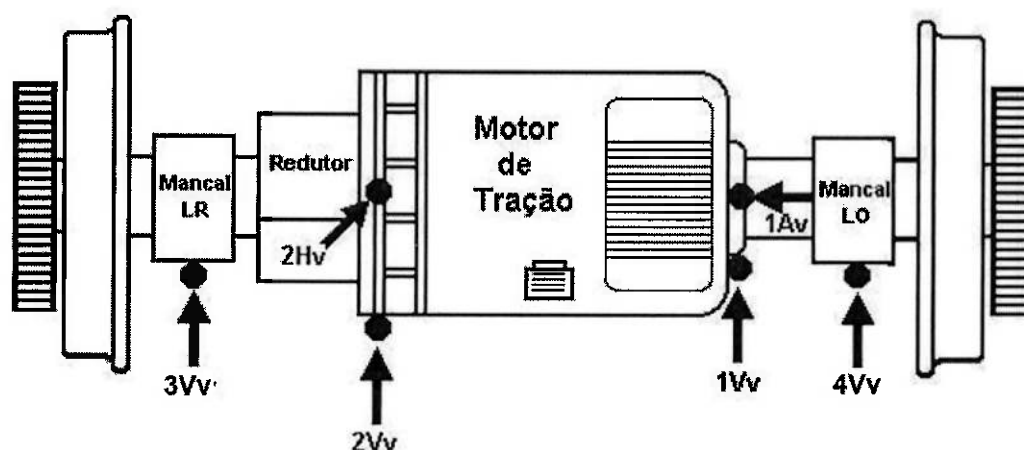


Figura 25 - Pontos de Medição da Vibração

Após término da coleta dos dados, os mesmos são transferidos através do equipamento Microlog para o microcomputador/rede com o software PRISM4 instalado com a identificação dos rodeiros. Caso algum dos alarmes indicados pelo software seja atingido, a equipe responsável pela análise dos dados é informada para a devida tomada de decisão.

ANEXO B

TESTE DE GIRO

O teste de giro é um importante procedimento utilizado na verificação das condições gerais de equipamentos rotativos. Em máquinas de grande porte, onde o movimento manual não é possível, as mesmas devem ser acionadas sem carga. Durante o movimento, a existência ou não de anormalidades deve ser verificada. O teste deve ser iniciado sem carga e em baixa rotação, e esta deve ser elevada gradativamente até a rotação nominal de operação.

Os principais itens a serem verificados são: vibração, ruído, pequenos choques mecânicos, escoriações, inconstância no torque devido a falhas na instalação, falhas no assento, torque excessivo devido à folga demasiada mente reduzida, atrito de vedação e desalinhamento.

No Metrô de São Paulo, este teste é realizado durante a permanência do trem em manutenção preventiva, dentro da vala (instalação civil que permite a visualização do sob-estrado das composições).

DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE

O trem deve ser estacionado em local apropriado (vala de manutenção), e com os macacos posicionados sob os mancais do rodeiro a ser testado, suspendê-lo de tal forma que as rodas girem livremente com as mãos.

A partir deste momento, a corrente na máquina de solda, que alimentará os motores de um mesmo truque, deverá ser ajustada até que o rodeiro entre em movimento e possibilite a verificação de ruído e qualquer outra anormalidade.



Figura 26 - Vista geral do Teste de Giro

ANEXO C

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS

- Ponta de corrente Yokogawa modelo 2343 04

Entrada

Escala CC 0 – 400 A com resolução de 0,1 A precisão de 1,3 %

Escala CC 0 – 1000 A com resolução de 1 A precisão de 1,3 %

Escala CA 0 – 400 A com resolução de 0,1 A precisão de 1,3 %

Escala CA 0 – 1000 A com resolução de 1 A precisão de 1,3 %

Para AC (40 a 500Hz)

Saída analógica

Escala 400 A CC 0 a 400 mV precisão de de 1,3 %

Escala 1000 A CC 0 a 100 mV precisão de de 1,3 %

- Analisador dinâmico de sinais HP 3560 A

De 31,25 mHz a 40 kHz $\pm 0,02$ %

Amplitude de entrada de 1 mVrms a 3,16 V rms

- Ponta de corrente Tektronix AM 503

Frequência de DC à 50 MHz.

Saída +80 mV e -80mV 5%.

- Alicate amperímetro Fluke 80I600

Escala de 2 A à 600 A

Precisão 30 à 100 Hz $\pm 3\%$

100 à 10 kHz $\pm 1\%$

Resposta em frequência 30 Hz à 1 kHz

Atenuação 1000:1