

**Antonio Marcio Barros Silva**

**Marcus Vinicius Romeiro Leal**

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE TENSÃO DE  
ALIMENTAÇÃO SOBRE O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DO  
MATERIAL RODANTE DO METRÔ-SP**

Monografia apresentada a Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Especialista  
em Tecnologia Metro-Ferroviária

Área de Concentração:  
Sistemas de Potência

Orientador:  
Prof. Dr. Wilson Komatsu

**São Paulo**

**2007**

ESP/TMF  
2007  
L473e

DEDALUS - Acervo - EPEL



31500019006

FICHA CATALOGRÁFICA

M2007 CC

**Leal, Marcus Vinicius Romeiro**

**Estudo sobre a influência do nível de tensão da alimentação sobre o consumo de energia elétrica do material rodante do Metrô-SP / M.V.R. Leal, A.M.B. Silva. -- São Paulo, 2007.**

**48 p.**

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

**1.Frenagem elétrica 2.Reostática 3.Material rodante 4.Metrô - São Paulo (SP) I.Silva, Antonio Marcio Barros II.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia III.t.**

1794231

## **AGRADECIMENTOS**

À Secretaria dos Transportes Metropolitanos – STM e à Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRÔ e Unimetro que viabilizaram a realização deste curso.

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

Aos colaboradores que contribuíram neste trabalho: Camila de Lima Leal, Edivaldo Wagner Martins, Frederico de C. Braga, José Florentino dos Santos Junior, Mário B. Arromba, Nivaldo Rodrigues de Macedo, Roberto Jorge dos Santos, Rodrigo Coura Oliveira e Rubens Martins.

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

Às pessoas que direta ou indiretamente nos auxiliaram neste trabalho:

Gerência de Manutenção: Nelson Scaglione e Jorge Martins Secall.

Hilton Romeo Quinsan, Rubens Bullara e Walter F. de Castro Filho.

Sérgio H. da S. Neves, José A. M. Catuta,  
Atilio Laudanna, Adalberto P. Ramos, Mario Fukumori,  
José Luiz Redondo de Oliveira, Annibale Memoli Neto,  
Marjorie Bevilaqua T. Nappo, Marco Pontieri Augusto,  
Waldomiro P. Junior e toda equipe ETL, Luciano da Silva e  
equipe EIL, Fabio Abud Ortona, Jackson de C. Galocha e  
equipe corretiva de Mat. Rodante da Linha 5, equipes do  
MTR/MRL.

Alstom do Brasil: Fabio Danilo de Souza e Kleber Ferraz

USP- POLI: Prof. Dr. Clovis Goldemberg e Dr. Cassiano Lobo Pires.

## **RESUMO**

O presente trabalho traz um estudo de caso em que é abordada a influência do nível de tensão de alimentação da subestação retificadora no consumo de energia elétrica do material rodante do Metrô de São Paulo. Mais especificamente, foi analisado o comportamento dinâmico da frenagem reostática num ambiente controlado e na operação comercial sob dois níveis de tensão de alimentação. A metodologia de análise aqui desenvolvida tem como base as teorias da tração elétrica que utilizam o sistema chopper, e os sistemas de alimentação elétrica de terceiro trilho. Aspectos qualitativos e quantitativos relacionados aos efeitos da alteração do nível de tensão da subestação retificadora foram abordados. Os resultados obtidos mostram que, é possível diminuir a energia dissipada nas resistências de frenagem e a consumida na aceleração através da adequação dos níveis de tensão ao contexto operacional em que a subestação retificadora está inserida, sem o comprometimento do desempenho do material rodante.

**Palavras-chave:** Frenagem Elétrica; Frenagem Reostática; Frenagem Regenerativa; Material Rodante; Trem; Metrô; Subestação Retificadora; Tap (transformador); Aceleração; Tração Elétrica; Chopper; Propulsão.

## **ABSTRACT**

This work presents a case study about the influence of the DC feeding voltage level in the electrical energy consumption from the rolling stock of the Metrô de São Paulo. The dynamic behavior of reostatic breaking was analyzed in a controlled environment and in the commercial operation, under two DC voltage feeding levels. The analysis methodology applied in this work is based on the electrical traction systems which use chopper systems, as well as electrical feeding systems using third rail. Qualitative and quantitative aspects related to the effects of the rectifying substation voltage level were studied. Results show that it is possible to reduce the dynamic breaking dissipated energy and consumed energy during acceleration through the adequation of the DC voltage levels, taking into account the rectifier substation environment, without compromising the performance of the rolling stock.

**Keywords:** electrical breaking; dynamic breaking; regenerative breaking; electrical energy savings; rolling stock; train, metro system; rectifier; substation; tap; acceleration; electric traction; chopper; propulsion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Diagrama unifilar da subestação primária	09
Figura 3.2 – Diagrama unifilar das subestações tronco	10
Figura 3.3 – Diagrama unifilar da subestação retificadora	11
Figura 3.4 – Comutador (escala)	13
Figura 3.5 – Comutador vista lateral	13
Figura 3.6 – Placa do transformador da retificadora	13
Figura 3.7 – Diagrama de blocos da alimentação elétrica da frota Cobrasma	16
Figura 3.8 – Chopper elementar	19
Figura 3.9 – Formas de onda de corrente e tensão na fase “n”	22
Figura 3.10 – Esquema elétrico simplificado da fase 3	23
Figura 5.1 – Diagrama de velocidades (km/h) da Via 61 – PIT	27
Figura 5.2 – Gráfico da potência dissipada – TAP B	28
Figura 5.3 – Gráfico da potência dissipada – TAP A	29
Figura 5.4 – Comparativo entre TAPs	29
Figura 5.5 – Gráfico da potência dissipada em ATO – TAP B	30
Figura 5.6 – Gráfico da potência dissipada em ATO – TAP A	30
Figura 5.7 – Diferença energia dissipada (TAP A – TAP B) 70 km/h à 36 km/h	31
Figura 5.8 – Diferença energia dissipada (TAP A – TAP B) 35 km/h à 0 km/h	32
Figura 5.9 – Programa de oferta de trens – Linha 3 Vermelha	33
Figura 5.10 – Gráfico: corrente e tensão na subestação de Vila Matilde (VTD)	35

## LISTA DE FIGURAS

Figura 5.11 – Gráfico: Potência fornecida – subestação de Vila Matilde (VTD)	36
Figura 5.12 – Gráfico: Consumo TAP A x TAP B – S.E. Retif. VTD e adjacentes	37
Figura 5.13 – Gráfico: Corrente e tensão de linha (TAP B) de 0 a 60 km/h	38
Figura 5.14 – Gráfico: Corrente e tensão de linha (TAP A) de 0 a 60 km/h	39
Figura 5.15 – Gráfico: Potência consumida na aceleração TAP B e TAP A	39
Figura 5.16 – Gráfico: Potência consumida na aceleração x velocidade	40
Anexo A – Esquema de Potência – Cobrasma	49
Anexo B – Diagrama do Sistema de Alimentação Elétrica da Linha 3	50

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Comparativo do consumo (dia útil)* entre Linhas 1 e 3	02
Tabela 2 – Níveis de ajustes de tensão no transformador	12
Tabela 3 – Limites de distorção harmônica de tensão – IEEE 519-1992	16
Tabela 4 – Desempenho requerido do material rodante	17
Tabela 5 – Energia dissipada em ATO – Via 61	31
Tabela 6 – Velocidade média em operação comercial da Linha 3 – Vermelha	32
Tabela 7 – Consumo medido no trecho Carrão-Patriarca	36
Tabela 8 – Consumo de energia na aceleração	40
Tabela 9 – Medições da DDP entre T.E. e T.V.	42



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A01 à A21 – Disjuntores de 88 kV  
ATC - *Automatic Train Controller* – Controle Automático de Trem  
ATO - *Automatic Train Operation* – Operação Automática dos Trens  
B01 à B06– Seccionadoras de 88 kV  
BEL – Estação Belém  
BFU - Estação Barra Funda  
BRE - Estação Bresser  
BX - Baixa Aderência  
C11 e C21 – Disjuntores de 22 kV  
CAR – Estação Carrão  
CAR1 - Estação Carrão – via 1 – sentido Itaquera para Barra Funda  
CCO - Centro de Controle Operacional  
CC – Corrente Contínua  
CEC - Estação Santa Cecília  
CM(F) – Contatores de freio  
CM(T) – Contatores de tração  
CMSP – Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô  
D – Ligação Delta (triângulo)  
DDP – Diferença de potencial  
DEO - Estação Marechal Deodoro  
E01 – Disjuntor de linha de tração  
E02 – Disjuntor de linha das auxiliares  
E08 e L08 – Disjuntor de acoplamento da barra de 22 kV  
E11 – Disjuntor de alimentação do grupo retificador

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

E71, E81, L71 e L81 – Disjuntores de linha de 22 kV  
F02 – Disjuntor reserva de corrente contínua  
F11, F21, F31 e F41 – Disjuntor de CC da alimentação do terceiro trilho  
GGD – Grupo gerador diesel  
H11, H21, H31 e H41 – Seccionadora de isolamento do terceiro trilho  
H12, H22, H32 e H42 – Seccionadora reserva do terceiro trilho  
IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistors* – Transistor bipolar de porta isolada  
IL - Corrente de Linha  
J11 – Seccionadora positiva  
L11 e L21 – Disjuntor de alimentação das auxiliares  
MAN - Modo de Operação do trem em MANUAL  
MCS - Modo de Operação do trem Semi-Controlado  
MD - Memorial Descritivo  
MM - Manual de Manutenção  
ND - Nível de Desempenho  
PCA – Estação Patriarca  
PCH – Caixa de lógica  
PECE - Programa de Educação Continuada em Engenharia  
PEN – Estação Penha  
PIT – Pátio de Itaquera  
POT – Programa de oferta de trens  
PP – Parada programada  
R11 – Seccionadora negativa  
RET – Seccionadora de retorno

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

S.E. – Subestação

Sinal BRK ou BRK - Sinal digital (0mA – freio e 100mA - tração)

Sinal P ou P - Sinal analógico proporcional de esforço trativo (Propulsão/Freio)

STM - Secretaria dos Transportes Metropolitanos

T1 e T2 – Transformador de 88 kV / 22 kV

TAB – Transferência automática de barra

TAP – Comutador de derivação

TAS – Transferência automática de setor

TAT1 – Estação Tatuapé – via 1 – sentido Itaquera para Barra Funda

TE – Terra externo (estação)

TT – Terra túnel

TV – Terra via

TYR(A) – Tiristor de parada

TYR(F) – Tiristor de freio

TYR(IV) – Tiristor de inversão

TYR(T) – Tiristor de tração

UL - Tensão de Linha

VPA – Estação Guilhermina / Esperança

VTD – Estação Vila Matilde

Y – Ligação estrela

YPS – Subestação Primária Pedro II

YTA – Subestação Primária Tatuapé

YVP – Subestação Primária Vila Esperança

YBF – Subestação Primária Barra Funda

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos e Motivação .....	2
<b>2</b>	<b>PREÂMBULO E SUBSÍDIOS PARA O ESTUDO .....</b>	<b>4</b>
2.1	A frenagem regenerativa no Metrô-SP .....	4
2.2	A tarifa de Energia Elétrica no Metrô-SP.....	6
2.2.1	Características dos Sistemas Tarifários.....	6
2.2.2	Modalidade Tarifária - Tarifa Azul.....	6
2.2.3	Composição Tarifária.....	7
<b>3</b>	<b>DESCRIÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO.....</b>	<b>8</b>
3.1	O sistema METROVIÁRIO .....	8
3.1.1	Alimentação e Distribuição de Energia Elétrica da Linha 3 - Vermelha.....	8
3.1.1.1	Características de Operação do Sistema.....	8
	Subestações Primárias.....	8
	Subestações Auxiliares .....	9
	Subestações Retificadoras.....	10
3.1.2	Sobretensão NEGATIVO-TERRA.....	14
3.1.2.1	Sistema de supervisão NEGATIVO-TERRA.....	15
3.1.3	Harmônicas.....	15
3.1.4	Material Rodante .....	16
3.1.4.1	Sistema de tração Cobrasma – princípio de funcionamento.....	17
3.1.4.2	Funcionamento do chopper elementar.....	19
3.1.4.3	Frenagem elétrica.....	20
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>28</b>
5.1	Verificação da hipótese – Modo MCS.....	28
5.2	Modo Automático de Condução – ATO.....	30
5.3	Operação comercial .....	34
5.3.1	Horário de “pico” .....	34
5.3.2	Horário de “vale” .....	35
5.3.3	Medições nas subestações retificadoras .....	36
5.4	Aceleração .....	39
5.5	Efeitos na qualidade da energia .....	43
5.4.1	Potencial Negativo-Terra .....	43

5.4.2	Harmônicos.....	45
6	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>46</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O Metrô de São Paulo é um sistema de transporte público rápido, seguro e de alta capacidade. Em operação desde setembro de 1974. Possui 60,2 km de extensão em suas 4 linhas, com 54 estações e uma frota de 117 trens.

A Linha 3 – Vermelha de Itaquera à Barra Funda, possui 22 km de extensão, 18 estações, 47 trens e 01 pátio de manutenção localizado em Itaquera.

O cenário atual do sistema de transporte metroviário de São Paulo, o qual apresenta um aumento de demanda e diminuição de receitas tarifárias, tendo como fator determinante o aumento das gratuidades, impele na busca de soluções técnicas que possam propiciar redução de custeio, sem o comprometimento do desempenho operacional. A busca da eficiência energética, no sentido holístico do contexto operacional de um sistema metro-ferroviário, é incompatível com o desperdício de uma quantidade de energia disponibilizada pela frenagem elétrica.

Os trens possuem a capacidade de devolver à rede em CC (corrente contínua), parte da energia utilizada na aceleração. Isto se dá pela conversão da energia cinética do movimento, durante a frenagem, em energia elétrica, quando os motores passam a funcionar como geradores.

Atualmente, em virtude do nível de tensão de saída das subestações retificadoras e, pela limitação de projeto dos metrocarros, o limite superior de tensão da rede (determinado pelo sistema de propulsão), é atingido com relativa frequência antes do término da frenagem, forçando a dissipação de parte desta energia nas resistências de frenagem na forma de calor.

A diferença tecnológica entre as frotas pode dar uma idéia da importância da frenagem regenerativa.

Na comparação da Linha 1 com a Linha 3 tem-se:

**Tabela 1 – Comparativo do consumo (dia útil)\* entre Linha 1 e 3**

<b>Linha</b>	<b>Consumo (MWh)</b>	<b>Número de Viagens</b>
1	633,22	946
3	620,20	1032

\*Dia 28/03/2007 (quarta-feira)

O consumo de energia elétrica totaliza aproximadamente 42 GWh/mês (nas quatro Linhas – 1, 2, 3 e 5), sendo o segundo maior gasto do Metrô de São Paulo. Deste total aproximadamente 75% da energia é consumida pelo material rodante.

## **1.1 Objetivos e Motivação**

A motivação fundamental é enfrentar o desafio de buscar-se a melhoria da eficiência energética do sistema metro-ferroviário, através de soluções de engenharia, que apresentem custo e exeqüibilidade compatíveis com as restrições orçamentárias decorrentes do atual cenário sócio-econômico.

### **Objetivo geral**

O presente trabalho tem como objetivo principal, estudar a influência do ajuste do nível de tensão de saída das subestações retificadoras sobre o consumo de energia dos metrocarros.

### **Objetivos específicos**

Os principais objetivos específicos a serem destacados, são:

- Mensurar o efeito causado no consumo de energia do material rodante, pela alteração do nível de tensão de saída da S.E. Retificadora;
- Identificar o melhor ajuste na tensão de saída da S.E. Retificadora, objetivando uma melhoria no rendimento energético do sistema;
- Obter redução da energia elétrica consumida pelos metrocarros, através do ajuste da tensão nas subestações retificadoras;
- Ampliar a visão sistêmica através do estudo concatenado de dois subsistemas metro-ferroviários – Alimentação Elétrica e Material Rodante.



## **2 PREÂMBULO E SUBSÍDIOS PARA O ESTUDO**

### **2.1 A frenagem regenerativa no Metrô-SP**

A operação comercial do Metrô-SP iniciou-se em setembro de 1974, inicialmente com o sistema de frenagem regenerativa desligado, em função problemas de projeto do sistema de tração da frota da Linha 1 – Azul detectados nos testes pré-operacionais. Esta situação permaneceu inalterada até 1977.

Após os retrabalhos realizados pelo fornecedor, o sistema de frenagem regenerativa foi implantado gradualmente em toda a frota, sendo concluída em março de 1978. Durante a implantação verificou-se que o nível de tensão de linha medido apresentava valores elevados, os quais comprometiam o desempenho da frenagem regenerativa.

Decidiu-se então proceder à diminuição do nível de tensão de alimentação em CC para os metrocarros.

Segundo Peter Alouche (ALOUCHE, 1986), as alterações permitiram os seguintes resultados:

- Sensível melhora na frenagem regenerativa;
- Nenhuma implicação no sistema de tração em termos operacionais.

Os resultados obtidos indicaram que a energia regenerada na frenagem apresentava valores entre 19 a 22% da energia cinética.

“Julgamos que a capacidade de regeneração entre 35 a 45% de sua energia cinética, um compromisso satisfatório entre custo e benefício para linhas em que a regeneração se processa de forma aleatória.” (Alouche, 1986).

O comportamento não linear do sistema é um fator restritivo importante para a melhoria na eficiência da regeneração ou co-geração, pois as seguintes condições devem ser satisfeitas:

- Nível de tensão suficiente para vencer as impedâncias entre a fonte geradora (trem ou subestação retificadora);
- Simultaneidade entre a fonte geradora e alguma carga apta a receber esta energia;
- Na impossibilidade de proporcionar a simultaneidade, acumular a energia gerada, através de inversores, acumuladores de energia à bateria, massa rotativa etc., para uso posterior.

Todas as frotas de material rodante do Metrô-SP possuem sistema de frenagem regenerativa (frotas 198 e 108 – Linha 1 – Azul, Alstom Milênio – Linha 2 - Verde, Cobrasma e Mafersa – Linha 3 Vermelha e Alstom A48 – Linha 5 – Lilás).

Segundo Peter Alouche (ALOUCHE, 1986), “as tensões de saída das retificadoras logicamente deverão ser mantidas acima da nominal do sistema justamente para que se obtenha a tensão nominal na maior extensão possível da linha”. Tal afirmação poderia ser enunciada com maior detalhamento, uma vez que a tensão de saída das retificadoras deve ser ajustada em função do contexto operacional em que está inserida, levando-se em consideração variáveis como: intervalo mínimo entre trens (Headway), carregamento, distâncias entre subestações, perfil de via e condições de restrição (falta de uma subestação adjacente).

## **2.2 A tarifa de Energia Elétrica no Metrô-SP.**

O item “energia elétrica”, o longo dos anos vem aumentando sua parcela na planilha de custeio operacional do Metrô-SP. Desde sua inauguração a novembro de 1979, o Metrô-SP foi beneficiado com um subsídio de 75% na tarifa de energia elétrica. Este desconto inicialmente concedido à tração elétrica urbana, foi sendo diminuído ao longo do tempo (portaria DNAEE 101/75), cessando-se em 1987.

Na composição dos custos da operação, a energia elétrica possuía uma participação de 4% em 1983. Em 1985 este valor já representava 11%, e continuou crescendo até 2004.

A partir de 2005, o Metrô-SP, deixou de ser “consumidor cativo”, e passou para a categoria de “consumidor livre”.

Por definição, consumidor livre é aquele que pode optar pela compra de energia elétrica junto a qualquer fornecedor, conforme legislação e regulamentos específicos.

### **2.2.1 Características dos Sistemas Tarifários:**

O faturamento é baseado na aplicação de uma tarifação binômia: CONSUMO (kWh) e DEMANDA (kW). Para os consumidores do grupo A2 (88 kV a 138 kV), existem dois modelos de tarifação, denominados: CONVENCIONAL e HORO-SAZONAL. O Metrô de São Paulo se enquadra na modalidade HORO-SAZONAL (a energia possui preços diferenciados de demanda e consumo de acordo com a utilização em determinados horários do dia e em períodos do ano).

### **2.2.2 Modalidade Tarifária - Tarifa Azul**

Neste sistema de tarifação, no qual o Metrô se enquadra, na composição da conta de energia elétrica são considerados as seguintes variáveis: período do ano (seco ou úmido), período do dia (ponta ou fora da ponta), consumo e demanda. A criticidade desta modalidade de tarifação está na ocorrência de ultrapassagem da demanda contratada, uma vez que a penalização é de 3 a 3,4 vezes o valor da tarifa normal.

### 2.2.3 Composição Tarifária

A demanda contratada atualmente para a Linha-3 Vermelha, nos horários de ponta e fora de ponta é composta de:

- Demanda contratada da S.E. Primária de Pedro II (YPS) - 13.700 kW;
- Demanda contratada da S.E. Primária de Tatuapé (YTA) - 14.000 kW;
- Demanda contratada da S.E. Primária de Vila Esperança (YVP) -12.000 kW;
- Parte da demanda contratada da S.E. Primária de Barra Funda (YBF) - 8.000kW.

As tarifas atualizadas (Julho de 2006) são:

- Demanda na ponta .....R\$ 20,6256 / kW
- Demanda fora de ponta .....R\$ 3,4457 / kW
- Consumo na ponta..... R\$ 0,0310 / kWh
- Consumo fora de ponta..... R\$ 0,0310 / kWh
- Multa de demanda na ponta.....R\$ 61,8768 / kWh
- Multa de demanda fora de ponta.....R\$10,3372 / kWh

### **3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO**

#### **3.1 O SISTEMA METROVIÁRIO**

##### **3.1.1 Alimentação e Distribuição de Energia Elétrica da Linha 3 - Vermelha**

###### **3.1.1.1 Características de Operação do Sistema**

O sistema de captação e distribuição elétrica da Linha 3 - Vermelha é composto de 04 subestações primárias de 88kV (uma compartilhada com a linha 2), 19 subestações retificadoras de 22kVca/ 750 Vcc e 19 subestações auxiliares de 22kVca/ 460Vca. Na subestação primária a tensão fornecida pela concessionária é convertida em 22 kV por transformadores de 88/22kV, 33MVA.

###### **Subestações Primárias**

As subestações primárias alimentam setores independentes do sistema elétrico como segue:

YBF – da estação Barra Funda (BFU) a estação Marechal Deodoro (DEO)

YPS – da estação Santa Cecília (CEC) a estação Bresser (BRE)

YTA – da estação Belém (BEL) a estação Vila Matilde (VTD)

YVP – da estação Guilhermina/Esperança (VPA) ao Pátio de Itaquera (PIT)

Na falta de uma subestação primária e, estando a adjacente em condições de socorrer outro setor, ocorre a Transferência Automática de Setores (TAS).

O sistema possui a capacidade de suprir eventuais faltas nos seguintes componentes: linha de entrada de 88kV, transformador de 88kV, transformador auxiliar de 22kV, barramento de 22kV, linha de 22kV, feeder de 750Vcc, uma subestação primária completa, uma subestação retificadora completa.

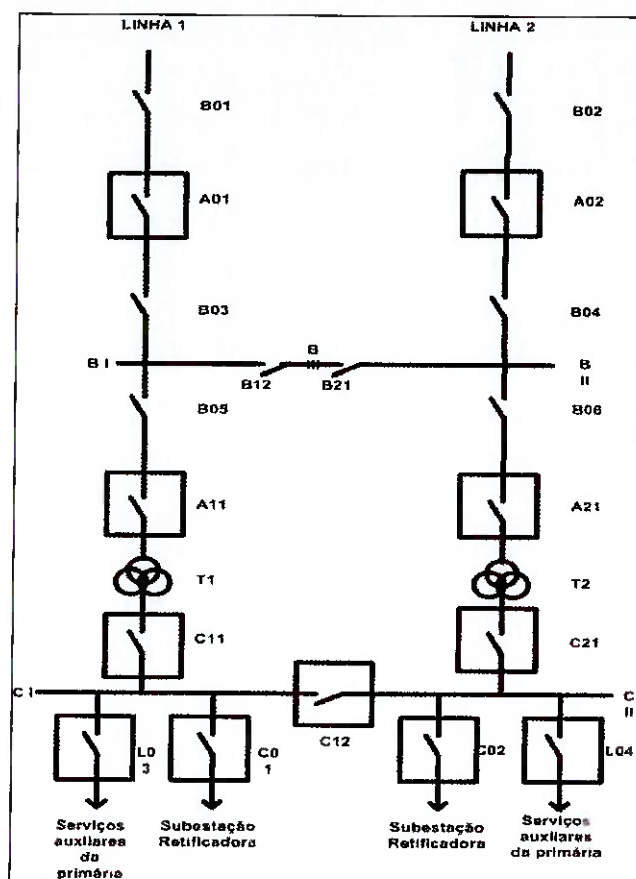
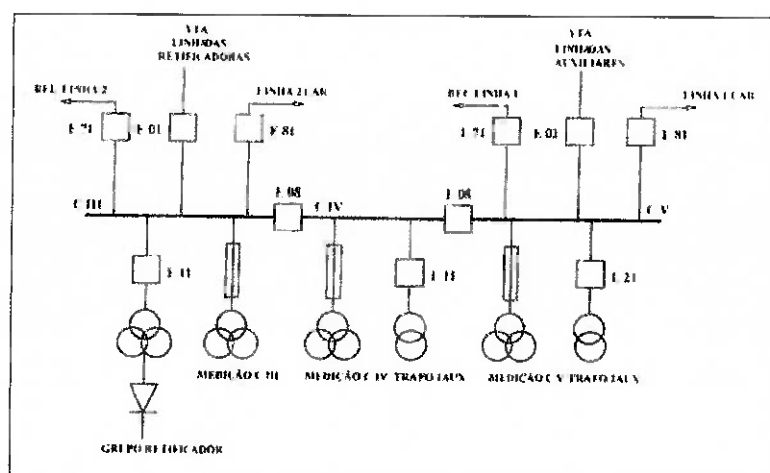


Figura 3.1 - Diagrama unifilar da subestação primária.

### Subestações Auxiliares

As subestações auxiliares recebem energia em 22kV proveniente das subestações primárias, distribuem em 22kV para alimentação do transformador do grupo retificador e transformam em 460Vca para o suprimento dos serviços auxiliares das estações.



**Figura 3.2 – Diagrama unifilar das subestações tronco.**

As subestações auxiliares possuem 2 linhas de entrada de 22kV e 2 linhas de saída, exceto nas subestações troncos que possuem 4 linhas de saída.

Havendo falta de tensão em uma linha do circuito de auxiliares, ocorre a Transferência Automática de Barra (TAB) na própria subestação ou na subestação adjacente em caso de defeito na barra.

A mesma analogia é válida para os circuitos de tração.

Havendo falta de tensão em um transformador de serviços auxiliares, ocorre o acoplamento nos quadros de baixa tensão e o sistema opera normalmente.

Havendo falta de tensão nos dois transformadores auxiliares o Grupo Gerador Diesel (GGD) entra em operação e alimenta os circuitos essenciais da estação.

### **Subestações Retificadoras**

A subestação retificadora tem como função principal fornecer energia elétrica, em 825 Vcc, ao terceiro trilho das duas vias, a partir de uma fonte de corrente

alternada de 22 kV, com potência nominal de 4512 kVA. É alimentada através do disjuntor E11 (vide Figura 3.3) e à sua saída existem as seccionadoras positiva (J11) e negativa (R11) acionadas simultaneamente.

No caso específico do Pátio Itaquera, a subestação retificadora é composta por dois grupos retificadores. Devido esta configuração, foi possível efetuar as medições na via de testes, sem as interferências decorrentes da circulação dos demais trens, pois a via de testes foi isolada eletricamente das demais vias do pátio.

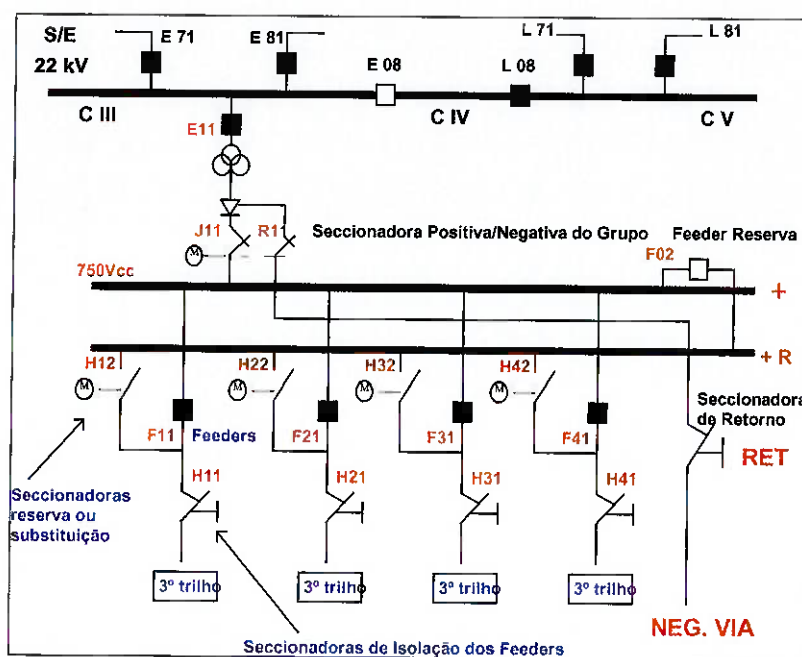


Figura 3.3 – Diagrama unifilar da subestação retificadora.

O transformador 22 kV/641Vca possui as seguintes características técnicas:

- Trifásico de três enrolamentos, imerso em silicone, com resfriamento natural, instalação abrigada;
- Potência de 4250 kVA;
- Ligações em Y-D-Y, defasados de 30°, dodecafásico;
- Impedância de curto circuito na posição de tensão nominal (primário/secundário) de 10,5%;



- Comutador de derivação (TAP), manobrável manualmente do nível do solo.

Os cabos de alimentação do primário do transformador possuem bitola de 1x250MCM por fase, cuja corrente nominal é 467A e classe de isolamento de 25kV.

A alimentação do terceiro trilho se dá através de 4 conjuntos de cabos, os quais possuem bitola de 5x750MCM, cuja corrente nominal por cabo é 601 A e classe de isolamento de 3kV.

### Comutador de derivações

O transformador possui comutador de derivações no enrolamento do primário, com 6 estágios de regulação do transformador em vazio, sendo 3 acima da tensão de entrada nominal, dois abaixo e um relativo à tensão nominal.

**Tabela 2 – Níveis de ajustes de tensão no transformador.**

Posição	%	Tensão (V)
A	+ 10	24200
B	+ 5	23100
C	+ 2,5	22500
D	Nominal	22000
E	- 2,5	21450
F	- 5	20900

As derivações para comutação do transformador desenergizado são dimensionadas para a potência nominal, isto é, o transformador fornece a potência nominal com o comutador em qualquer uma das derivações, sem superar os limites de temperatura especificados.

A posição do comutador de tensão é indicada localmente. A tensão aumenta girando o dispositivo de comando manual no sentido horário (ao maior número, corresponderá a maior tensão).

O comutador é provido de bloqueio mecânico, travado com cadeado, para evitar manobras estando o transformador sob tensão.

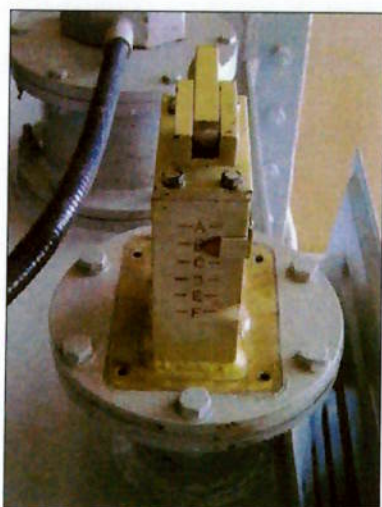
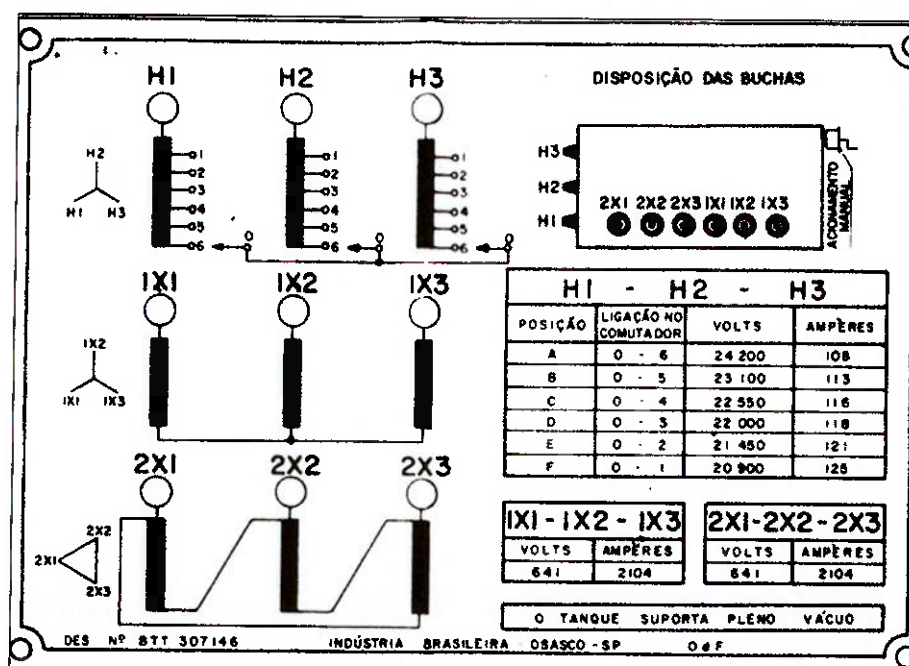


Figura 3.4 – Comutador (escala).



Figura 3.5 – Comutador vista lateral.



**Figura 3.6 – Placa do transformador da retificadora.**

### **3.1.2 SOBRETENSÃO NEGATIVO-TERRA**

A alimentação elétrica dos trens é realizada através de uma tensão de 750Vcc transmitida pela subestação retificadora ao terceiro trilho (terminal positivo) e trilhos de rolamento (terminal negativo). Esta tensão é captada pelo trem através do contato do terceiro trilho com suas sapatas coletoras e dos rodeiros do trem com os trilhos de rolamento.

O terminal negativo da alimentação dos trens é chamado TV (terra via) e é isolado na medida do possível das estruturas de concreto que suportam o trilho, que são chamados de TE (terra externo da estação).

A circulação do material rodante, em função das potências envolvidas, provoca o surgimento de diferenças de potenciais entre o sistema de aterramento das estações e o terra da via (trilho de rolamento).

Esta diferença de potencial é crítica, pois pode expor o usuário do sistema a níveis de tensões indesejáveis. Uma pessoa que esteja embarcando no trem, e toque na caixa do metrocarro, estará exposta à chamada diferença de potencial “negativo-terra”. Os níveis de segurança desta diferença de potencial devem estar em conformidade com as normas CENELEC EN 50122-1 e EN 50122-2.

O sistema de aterramento, utilizado no Metrô-SP é composto por:

- TV – terra via, é o negativo da subestação retificadora e do trilho de rolamento dos trens. A caixa do trem também está neste potencial;
- TE – terra externo, são as ferragens da estação e o potencial do piso da plataforma e do ambiente externo;
- TT – terra túnel, são as ferragens estruturais das vigas suportes de concreto, sob o trilho de rolamento e as ferragens dos túneis. É uma forma de confinar as correntes de fuga, que fluem pelo TV e podem atingir o TE, podendo causar corrosão eletrolítica nas estruturas.

### 3.1.2.1 Sistema de supervisão NEGATIVO-TERRA

O sistema elétrico de tração (750Vcc) da Linha 3 – Vermelha, possui um sistema de supervisão de diferença de potencial entre o negativo e terra. Os relés de sobretensão ao serem atuados, desenergizam o setor alimentado pela subestação retificadora, através dos comandos de abertura do sistema de proteção.

A função principal do sistema de proteção ao usuário é promover o curto entre os terras da Via (TV) e o Estrutural (TE), sempre que a tensão for superior aos valores normalizados, sinalizar e comandar a abertura dos alimentadores da subestação em que aconteceu o evento e as subestações adjacentes.

A atuação por sobretensão Negativo-Terra pode gerar um grande impacto operacional, causando a paralisação no setor ou mesmo em toda Linha.

### 3.1.3 Harmônicas

Como mencionado por Rodrigues (RODRIGUES, 2000) temos:

“Desde 1990, harmônicas tornou-se a palavra de ordem em qualidade de energia; distúrbios elétricos causam desligamentos e danos a equipamentos criando problemas a um número crescente de consumidores e respostas às questões como sobrecarga no condutor neutro, perdas de tensão, sobreaquecimento de transformadores ainda não foram respondidas satisfatoriamente (MURPHY, 1997).”.

“As cargas não lineares, como dispositivos a semicondutores para alimentação e controle de equipamentos de potência, têm contribuído significativamente para a degradação da qualidade de energia fornecida ao consumidor. As componentes harmônicas não realizam trabalho ou produzem potência na carga; entretanto, existem impactos negativos, tanto para o consumidor, quanto para a concessionária: o valor total da corrente absorvida aumenta; possíveis ressonâncias entre cargas indutivas e capacitivas, provocando danos por sobretensões; interferência em linhas de comunicação que correm próximas com os condutores de potência, e, aumento das perdas do condutor neutro em sistemas trifásicos, resultantes da circulação de componentes com frequências da 3ª harmônica ou de seus múltiplos.”.

“Desta forma, recomenda-se, num curto espaço de tempo, a elaboração de normas e recomendações a nível nacional para eletrodomésticos, bem como para lâmpadas de descarga, para que os mesmos obedeçam a um

**limite de 5%** na distorção harmônica total (THD) da sua corrente de operação, respeitando, também a nova regulamentação de fator de potência.”.

Os limites para Harmônicas em sistemas com tensão nominal abaixo de 69KV, recomendada pela IEEE (IEE Std 519-1992, 1992) são:

**Tabela 3 - Limites de distorção harmônica de tensão – IEEE 519-1992**

<b>Tensão Nominal</b>	<b>Distorção Harmônica de Tensão Individual (%)</b>	<b>Distorção Harmônica de Tensão Total (THD%)</b>
Até 69kV	3,0	5,0
69kV a 161kV	1,5	2,5
Maior 161kV	1,0	1,5

### **3.1.4 Material Rodante**

A frota do Material Rodante da Linha 3 – Vermelha é composta por 47 trens de 6 carros, fornecidos pelas empresas: Cobrasma (25 trens) e Mafersa (22 trens). O início da operação comercial ocorreu em 10/03/1979 com os trens da frota da Linha 1 – Azul. A partir de setembro de 1983, foram realizados os testes de aceitação das frotas Mafersa e Cobrasma, e os trens da frota da Linha 1 foram sendo substituídos gradativamente.

O Material Rodante da Linha 3 – Vermelha é alimentado por tensão nominal de 750 Vcc, podendo apresentar variação de +20% e -33% conforme norma IEC-349. O sistema de propulsão possui sistema de acionamento dos motores de tração de

corrente contínua do tipo “chopper”. Os sistemas auxiliares são alimentados em 220 Vca e 48 Vcc.

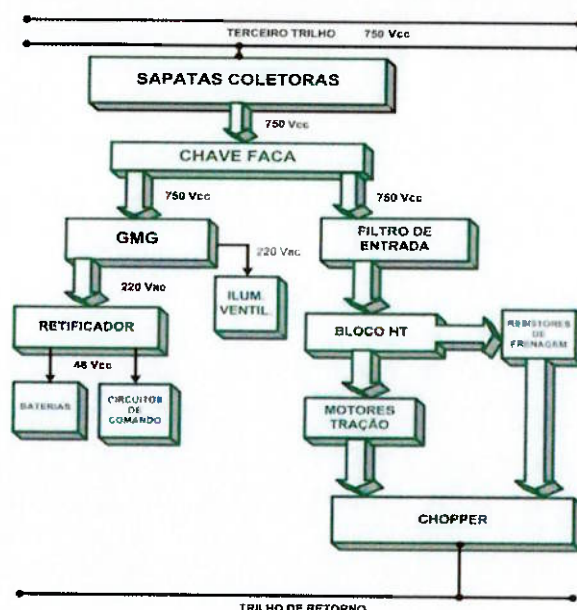


Figura 3.7 – Diagrama de blocos da alimentação elétrica da frota Cobrasma.

Devido à necessidade de desempenho operacional, todos os carros possuem sistema de tração (não há carros tipo “reboque”). A especificação de desempenho do Material Rodante, independentemente da carga, em tangente e nível e rodas novas, é:

Tabela 4 – Desempenho requerido do Material Rodante

Taxa de aceleração	1,12 m/s <sup>2</sup>
Tempo para atingir 80 km/h	< 33 s
Taxa de frenagem	1,2 m/s <sup>2</sup>

### 3.1.4.1 Sistema de tração Cobrasma – princípio de funcionamento.

Os equipamentos e componentes do sistema de tração e frenagem estão distribuídos de tal forma que, ficam alocados no sobrestrado os circuitos de comando e a parte de potência no subestrado.

Há 3 modos de condução:

MODO MAN (Manual) - O operador pode conduzir livremente o trem (independentemente da existência de código de via), porém a velocidade é limitada em 30 km/h.

MODO MCS (Semi-Automático) - O operador pode conduzir livremente o trem, porém é impossibilitado de ultrapassar a velocidade máxima determinada do trecho imposta pelo Código de Via.

MODO ATO (Automático) - A condução do trem é realizada de forma automática pelo ATC de Bordo. O ATC controla o erro de velocidade (diferença entre a velocidade real e a velocidade permitida no trecho), as paradas nas estações, abertura e fechamento de portas. As taxas de aceleração e frenagem, e a velocidade máxima são determinadas pelo sinal de Nível de Desempenho, transmitido pelo ATC da estação.

Para o controle de tração/ frenagem, são utilizados dois sinais: P e BRK.

Estes sinais de comando são gerados, dependendo do posicionamento do controlador mestre (instalado nas cabines), quando da condução em modo MANUAL ou MCS. No modo ATO, a geração é feita pelo ATC de bordo.

Estes sinais são gerados através de uma fonte de corrente (0 a 100 mA), sendo que o sinal P é proporcional ao nível de aceleração/ frenagem requerida, e o BRK é 0 mA para freio e 100 mA para tração.

A idéia de utilizar-se uma fonte de corrente é para garantir que qualquer interrupção no train line dos sinais P ou BRK, leve a composição à condição de freio máximo (0 mA em ambos os sinais).

Em cada carro, os sinais P e BRK são processados pelo sistema de controle lógico da tração, o qual gera os pulsos liga/ desliga para o equipamento de controle estático – chopper.

A variação da porcentagem de tempo ligado e desligado possibilita ao equipamento de comando manter a corrente dos motores dentro de uma tolerância de 50 A em relação à corrente necessária para atingir a aceleração requisitada.

Não sendo possível manter uma corrente constante nos motores pela taxa de liga/desliga, (e isto ocorre quando o motor atinge a sua curva característica para campo máximo), o equipamento de comando envia um sinal para o equipamento de manobra e este efetua a redução do campo dos motores (shuntagem).

Após a redução, o chopper controla a corrente nos motores até o limite de corrente dado pela curva característica do motor. O chopper permanece chaveando com tempo ON máximo e OFF mínimo. A idéia é permitir que a qualquer momento, haja a possibilidade de interromper-se a corrente antes da abertura das chaves de potência, com o objetivo de não danificá-las, pois são eletromecânicas e eletromagnéticas.

#### 3.1.4.2 Funcionamento do chopper elementar.

Ao comandar o disparo do tiristor de tração TYR(T), a corrente  $i$  circula pelos motores.

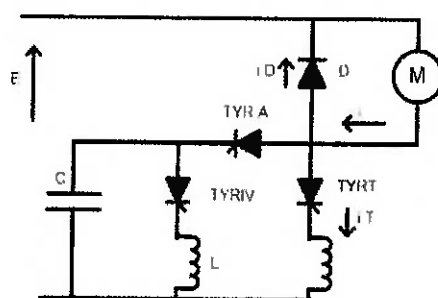


Figura 3.8 – Chopper elementar.

Para interromper a circulação de corrente, é disparado o tiristor de inversão TYR (IV), o qual faz com que o capacitor inverta sua polaridade através do indutor L. Ao término de meio período, a corrente passa por zero e o tiristor de inversão TYR (IV) é bloqueado. Na seqüência, é disparado o tiristor de parada TYR (A), bloqueando



assim (por tensão reversa) o tiristor de tração TYR (T). A corrente do motor passa a carregar o capacitor C até que sua polaridade se inverta, passando a circular a corrente pelo diodo de roda livre. O tiristor de parada TYR (A) é bloqueado, pois a corrente  $i$  deixa de circular por ele. O tiristor de inversão TYR (IV) é disparado exatamente antes do disparo do tiristor de parada TYR (A), objetivando minimizar as perdas de carga do capacitor.

### 3.1.4.3 Frenagem elétrica

O sistema de tração proporciona frenagem totalmente elétrica desde a velocidade máxima até cerca de 10 km/h, onde gradativamente é substituída pela frenagem de atrito até a parada total da composição.

O sistema possui três modos de frenagem:

- Totalmente regenerativa
- Parcialmente regenerativa
- Totalmente reostática\*

\* Durante qualquer ciclo de frenagem, quanta vezes as condições de receptividade da linha exigir.

A energia cinética dos carros em movimento, convertida em energia elétrica através dos motores (operando como geradores), é enviada prioritariamente ao sistema de alimentação elétrica, quando este estiver receptivo, ou dissipada nas resistências existentes sob o estrado do carro.

Até a tensão de 850 V, o sistema efetua a frenagem regenerativa. Vale salientar que uma pequena parte desta energia é dissipada nos resistores de queda de tensão.

Entre 850 V e 900 V, parte da energia regenerada é dissipada nos resistores de frenagem reostática.

Quando a tensão de linha atinge 900 V, a energia cinética do movimento que está sendo convertida em energia mecânica pelo conjunto de engrenagens (redutores) e esta por sua vez, sendo convertida em elétrica pelo motor de tração (agora operando como gerador), passa a ser dissipada no bloco de resistores de frenagem.

Em linha totalmente receptiva, o sistema de frenagem elétrica tem capacidade de regenerar pelo menos 30% da energia cinética total, durante um ciclo completo de frenagem.

Ao comutar para modo freio através do controlador mestre (ou pelo sistema de controle automático de trem – ATC), o sistema de freio de atrito (o qual é independente do sistema de freio elétrico) é acionado. A pressão enviada aos cilindros de freio, de forma simplificada, será a resultante entre a demanda de freio solicitada acrescida do peso do carro, subtraída da corrente elétrica de frenagem.

Devido à limitação de tensão dos tiristores, na época do desenvolvimento do projeto do Material Rodante, o chopper foi implementado com três fases em paralelo, sendo cada fase formada por um chopper elementar. O diagrama esquemático de potência da frota Cobrasma é representado no ANEXO A.

Cada chopper elementar ou fase opera à frequência de 360 Hz e tempo de condução variável.

As três fases estão em paralelo e são defasadas, uma em relação à outra, de um terço do período, o que permite reduzir a ondulação da corrente de linha e da corrente do motor. Nas partidas e manobras com correntes baixas, utiliza-se submúltiplos da frequência nominal.

O filtro de entrada é composto por um indutor de linha (SF-FI) de 0,75 mH e um capacitor de linha (CAP-FI) de 5 mF. O objetivo é reduzir a oscilação da tensão da linha e filtrar a corrente de entrada.

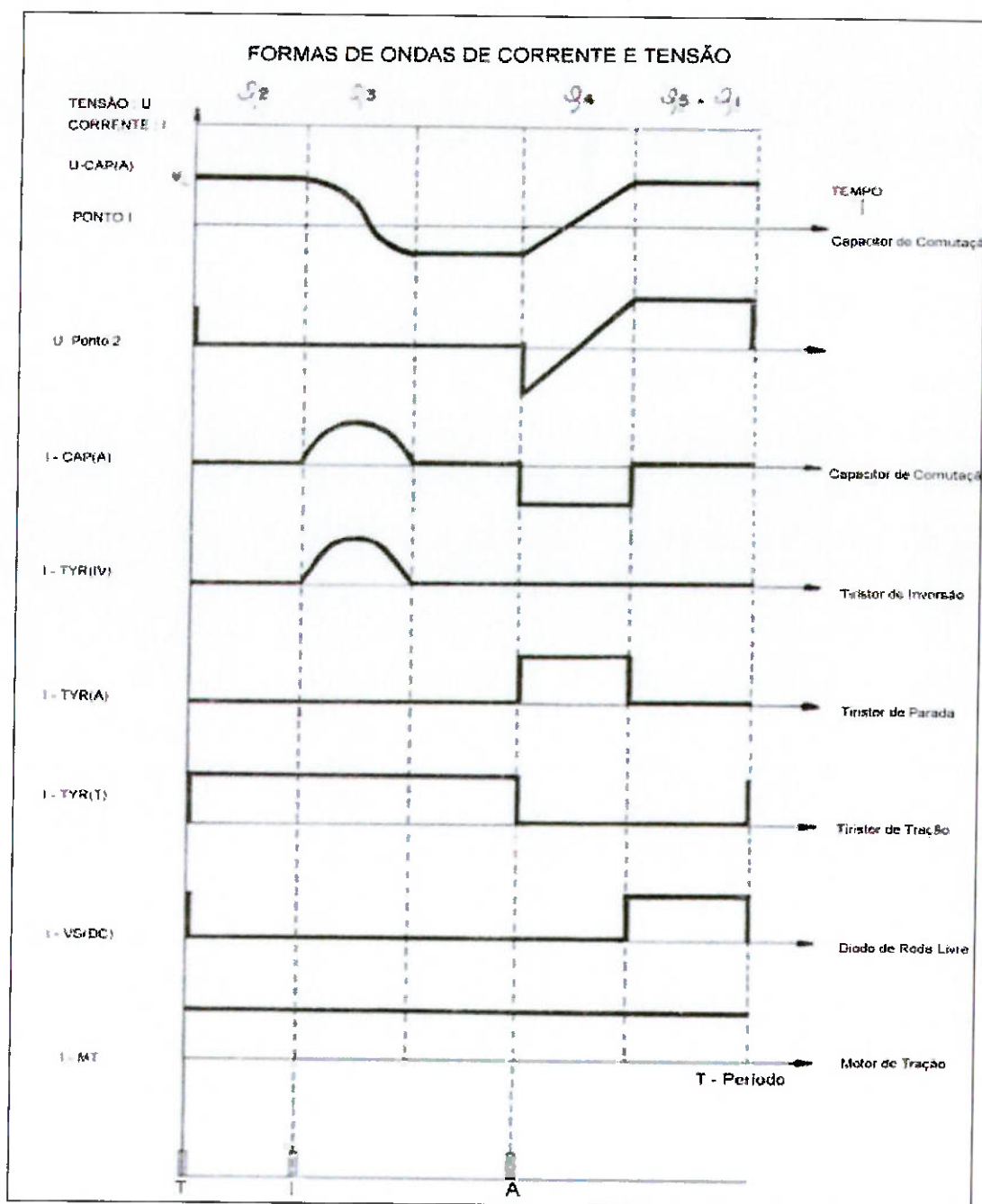
Na energização, o capacitor de linha é carregado por meio da resistência de pré-carga do filtro R1(ALI)FI, com o fechamento do contator de pré-carga do filtro C(ALI)FI.

Com o término da pré-carga, o relé de tensão QFI habilita o fechamento do disjuntor DJ, e desenergiza o contator C(ALI)FI. A partir deste momento temos o circuito de potência alimentado e pronto para iniciar o disparo dos tiristores.

A caixa de lógica (PCH) monitora a tensão estática em vários pontos do circuito de potência, e só autoriza o disparo dos tiristores se estiverem dentro dos valores esperados.

Na tração, havendo a solicitação de propulsão pelo operador através do controlador mestre, a caixa de lógica comanda o disparo dos tiristores de tração de cada fase TYR(T).

O chopper opera como redutor de tensão com a finalidade de evitar perdas na partida. O indutor L garante a conservação da corrente no circuito motor/ diodo de roda livre quando o chopper está bloqueado.



**Figura 3.9 – Formas de onda de corrente e tensão na fase “n”.**

Na frenagem, o chopper opera como elevador de tensão. A fonte de tensão é o motor de tração (operando como gerador), a carga pode ser a linha (frenagem regenerativa) ou os resistores de frenagem (frenagem reostática).

Estando em velocidade maior que 10 km/h, ao solicitar freio através do controlador mestre, a caixa de lógica diminui a corrente de tração gradativamente até valores próximos de zero para que a abertura dos contadores de tração CM(T) 1,2, C(T)3 e CRS(T) ocorram sem carga. Na seqüência comanda o fechamento dos

contatores de freio CM(F) 1,2 e C(F) 3. Com auxílio da escorva, os motores começam a gerar energia elétrica (proveniente da conversão da energia mecânica – oriunda da energia cinética do movimento).

A autorização de funcionamento do chopper é dada somente se todos os contatores estiverem posicionados corretamente, e se as condições de ventilação e alimentação forem satisfeitas. O aparecimento de um defeito provoca imediatamente a anulação dessa autorização.

A regulação da corrente de frenagem regenerativa (tensões de linha menores que 860 Vcc) se dá através do chaveamento dos tiristores de freio das fases 1 e 2 TYR(F) 1 e TYR(F) 2. Em função do nível de tensão de saída da retificadora, da velocidade e da taxa de frenagem requerida, a tensão de linha pode ultrapassar o valor de 860 Vcc; a partir deste instante o tiristor de tração da fase três TYR(T) 3 é disparado, e através do circuito formado pelo contator C(F) 3, e indutor SFL 3, dissipa a energia excedente na forma de calor nas resistências de frenagem R(H) 3.

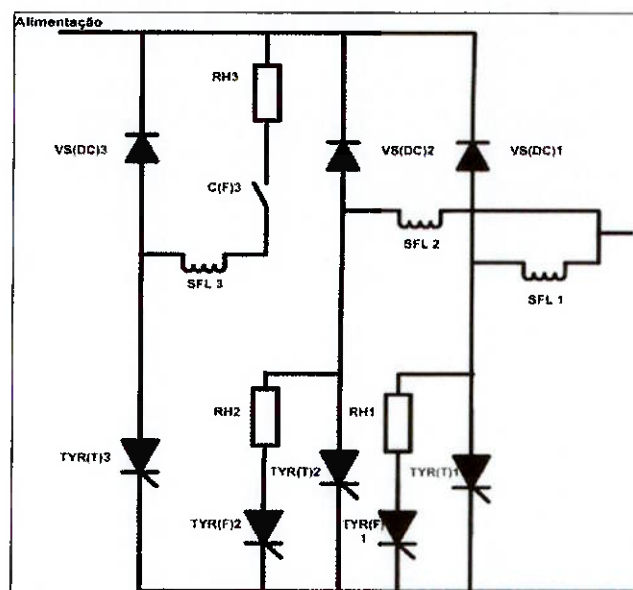


Figura 3.10 – Esquema elétrico simplificado da Fase 3

## 4 METODOLOGIA

Em virtude das interferências operacionais provocadas pela realização de medições em todos os carros de uma determinada composição, concomitantemente nas várias subestações retificadoras alimentadas por uma determinada Estação Primária, e da impossibilidade de efetuarem-se medições durante a operação comercial nos carros intermediários devido à presença de usuários, optou-se por uma abordagem através da técnica de amostragem.

Primeiramente foi definida a linha a qual seria objeto do estudo. Na seqüência foi escolhida uma das frota que circulam nesta linha, um local para testes em ambiente controlado, que permitisse a adequada configuração da alimentação elétrica e a região da via onde poder-se-ia realizar as medições de consumo nas subestações retificadoras durante a operação comercial. Devido o uso desta metodologia, uma perda de dados específicos é verificada, mas os testes nos ambientes controlados, em conjunto com as medições na operação comercial em horários de alta e baixa demanda de passageiros permitiram latas conclusões.

Na definição do escopo optou-se pela Linha 3 – Vermelha, por esta apresentar maior facilidade para implementar-se um ambiente controlado. No Pátio Itaquera foi utilizada a via 61 (via de testes dinâmicos), a qual possui duas estações e um perfil de via que permite desenvolver velocidades em ATO maiores que 62 km/h entre as estações (velocidade de parada programada – PP, utilizada nas entradas das estações ao longo da Linha 3 - Vermelha), proporcionando frenagens com características mais próximas da condição operacional.

A opção pela frota Cobrasma deveu-se primeiramente pela possibilidade de “simular carro carregado” alterando-se a informação do sensor de carga, pela

disponibilidade de trem para a execução dos testes nas datas programadas e por possuir um transdutor de corrente na fase 3 do chopper (fase responsável pela frenagem reostática).

Outros fatores determinantes para a escolha foram:

a) a facilidade de acesso à subestação retificadora do Pátio Itaquera, fator fundamental para proporcionar maior dinâmica durante a realização dos testes, tornando possível a alteração dos TAPs do primário do transformador da retificadora e a imediata verificação prática do resultado em testes dinâmicos na via 61;

b) a distância entre a subestação e a linha de testes, minimizando a queda de tensão nos cabos e possibilidade de isolar-se eletricamente a via de testes das demais vias do pátio.

Foram estudados os sistemas: Material Rodante, Alimentação Elétrica, e processos do Centro de Controle Operacional.

Os testes dinâmicos foram realizados utilizando-se trens e carros aleatoriamente escolhidos da frota Cobrasma, com o objetivo de validarem-se as extrapolações utilizadas das medições efetuadas em um único carro, para a totalidade da frota. Desta forma, as medições de correntes, tensões e velocidades em trens e carros diferentes, por apresentarem resultados muito semelhantes, foram extrapolados para os demais carros e trens da frota.

Para os cálculos relativos à energia dissipada no bloco reostático durante a operação comercial pela frota circulante foram utilizadas esta mesma metodologia. Esta consideração é possível pelo fato de que o desempenho dos trens, exigido nas especificações técnicas e confirmado nos testes de aceitação, deve ser idêntico para valores relativos a taxas de aceleração e frenagem, independentemente se carro vazio ou carro lotado.

As medições realizadas durante a operação comercial, foram programadas para dias e horários mais adequados para a observação das variáveis envolvidas no estudo, de acordo com o Programa Horário utilizado pelo Centro de Controle Operacional.

A condição de baixa aderência (BX) não foi estudada, uma vez que, as taxas de aceleração e frenagem são substancialmente diminuídas pelo sistema de Controle Automático de Trem (ATC) em caso de precipitação.

Para as medições de corrente, tensão e diferença de potencial entre negativo-terra nas Subestações Retificadoras ao longo da via comercial, foram instrumentadas cinco delas simultaneamente, da seguinte forma: uma central (a qual teve o TAP alterado) e quatro adjacentes; sendo destas, duas a Leste e duas a Oeste. Isto foi feito, objetivando a análise dos efeitos decorrentes da alteração do nível de tensão de saída de uma dada Subestação Retificadora, nas Subestações Retificadoras próximas a ela.

O trecho de via em que foram feitas as medições vai da estação Carrão à estação Patriarca. Desta forma, as subestações retificadoras abrangidas pelo estudo foram: S.E. Carrão, S.E. Penha, S.E. V. Matilde, S.E. Guilhermina-Esperança e S.E. Patriarca.

Para as medições, foram utilizados instrumentos de mercado, medidores de energia instalados nas subestações auxiliares e o aquisitor de dados desenvolvido com o uso da ferramenta Labview da National Instruments.

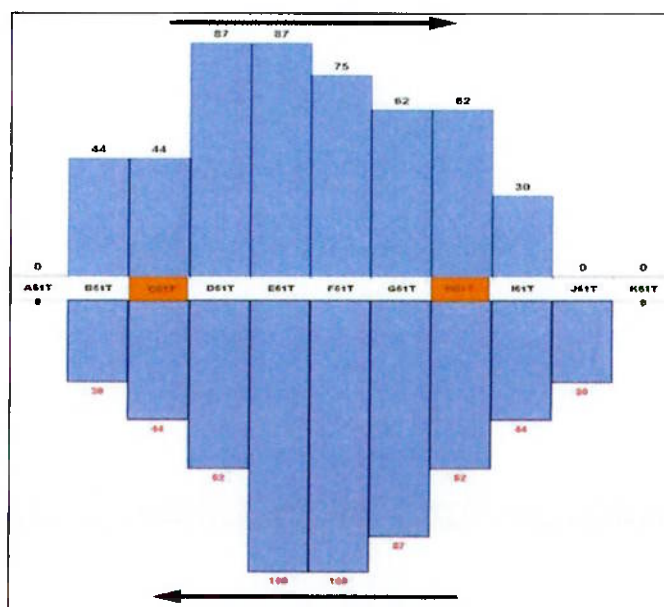


## 5 RESULTADOS

### 5.1 Verificação da hipótese – Modo MCS

Para a verificação da hipótese num ambiente controlado foram realizados testes na via 61 do Pátio Itaquerá. O sistema de alimentação elétrica foi alterado, de tal forma que a via 61 fosse desconectada eletricamente das demais vias do pátio.

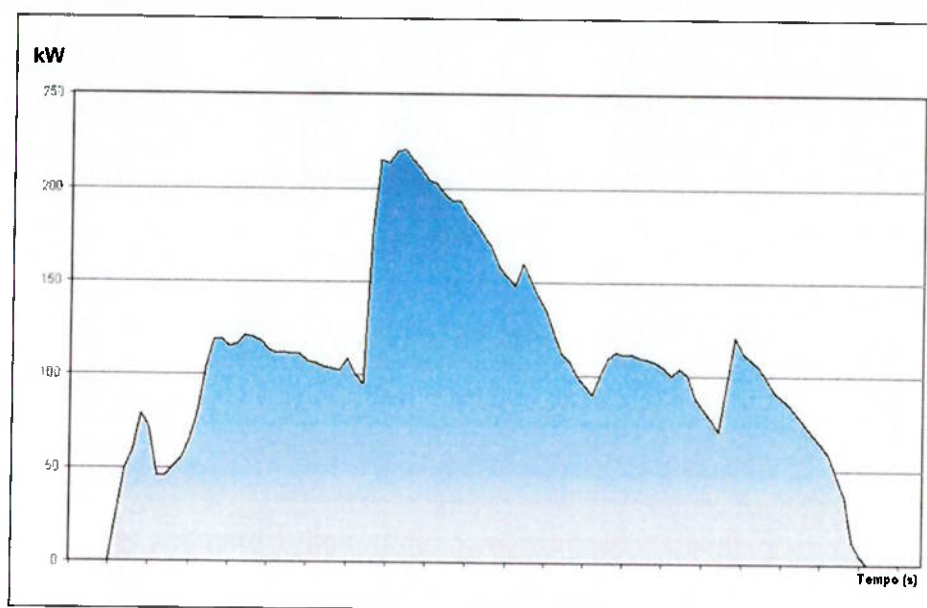
O trem utilizado nos testes foi o T-322 da frota Cobrasma, e o carro instrumentado foi o C-3128. A instrumentação foi realizada através de notebook padrão IBM-PC, com software de aquisição de dados, desenvolvido por meio da ferramenta Labview da National Instruments, cartão pcmcia e adaptador para caixa de lógica.



**Figura 5.1 – Diagrama de velocidades (km/h) da Via 61 – PIT**

Os sinais registrados foram: Sinal P (AP), Tensão de Linha (UL), Correntes das fases 1, 2 e 3 respectivamente (Iph1, Iph2 e Iph3) e Velocidade (MV).

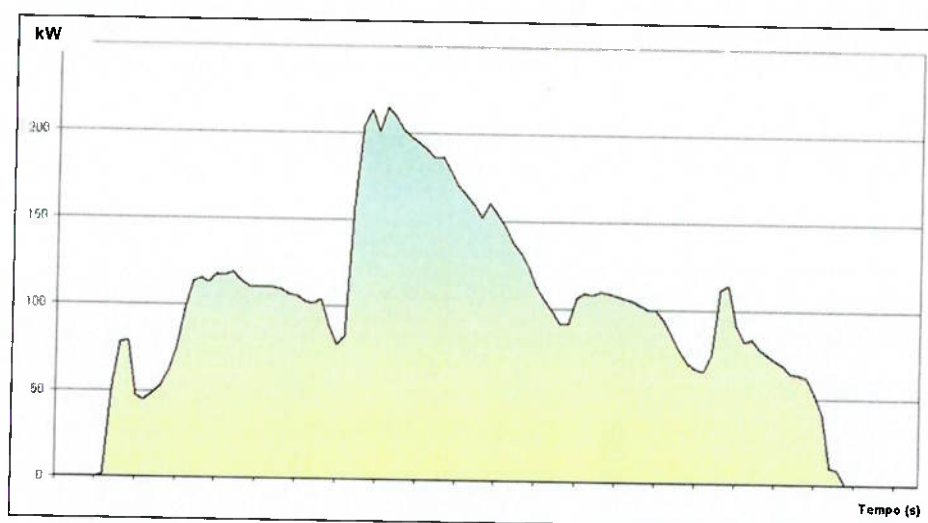
Foram realizadas corridas no modo MCS, partindo da velocidade zero com aceleração máxima, e ao atingir a velocidade máxima permitida (aprox. 63 km/h), aplicava-se freio máximo até a parada do trem. Foram realizadas corridas em ambos sentidos, primeiramente com o comutador de TAP da S.E. Retificadora na posição atual (B), equivalente a +5% da tensão nominal. A energia dissipada nas resistências de frenagem foi 1,8 kWh por frenagem.



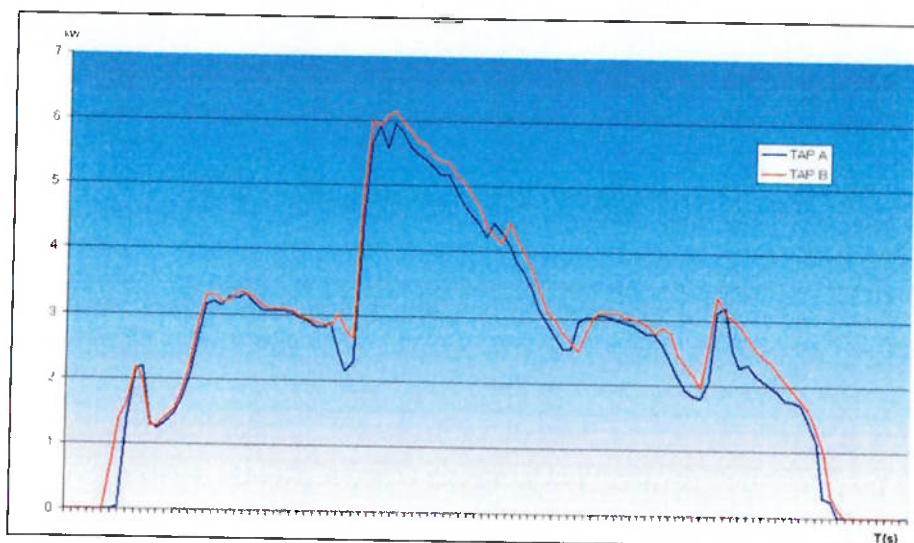
**Figura 5.2 – Gráfico da Potência dissipada – TAP B**

Na seqüência foi alterada a relação de transformação do transformador. O comutador de TAP foi alterado para a posição A, a qual equivale a +10% da tensão nominal. Vale informar que a relação +X%, quer dizer: Caso a tensão de entrada de 22kV esteja acima da nominal em X%, ao posicionar em +X%, abaixaremos o valor da tensão e teremos a tensão nominal na saída do transformador.

Foram realizadas corridas respeitando-se as condições anteriores, com relação a sentido, taxa de aceleração e frenagem. A energia dissipada nos resistores foi 1,7kWh por frenagem.



**Figura 5.3 – Gráfico da potência dissipada – TAP A**



**Figura 5.4 – Comparativo entre TAPs.**

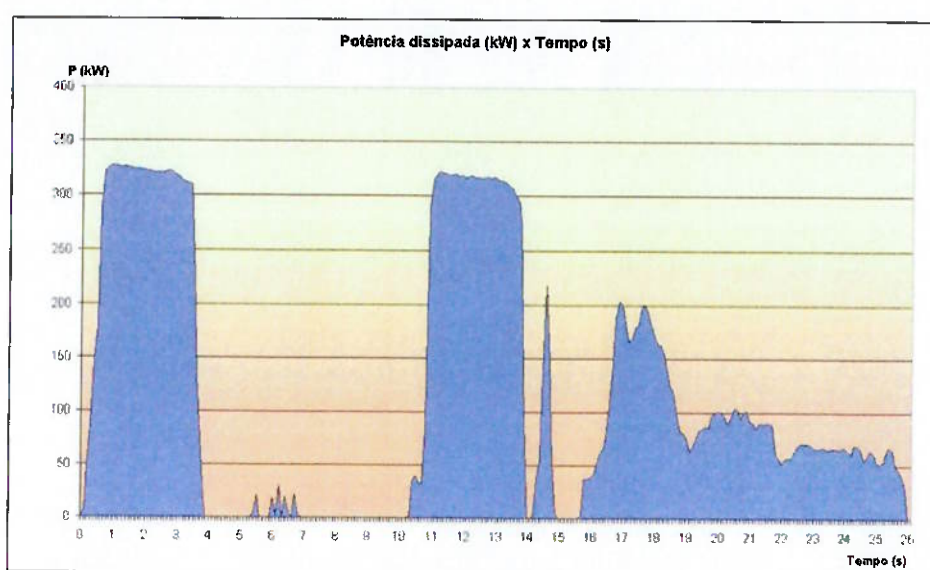
Comparando-se o resultado das medições, foi verificado que a alteração proporcionou uma redução da energia dissipada nas resistências na ordem de 6,3%.

## 5.2 Modo Automático de Condução – ATO

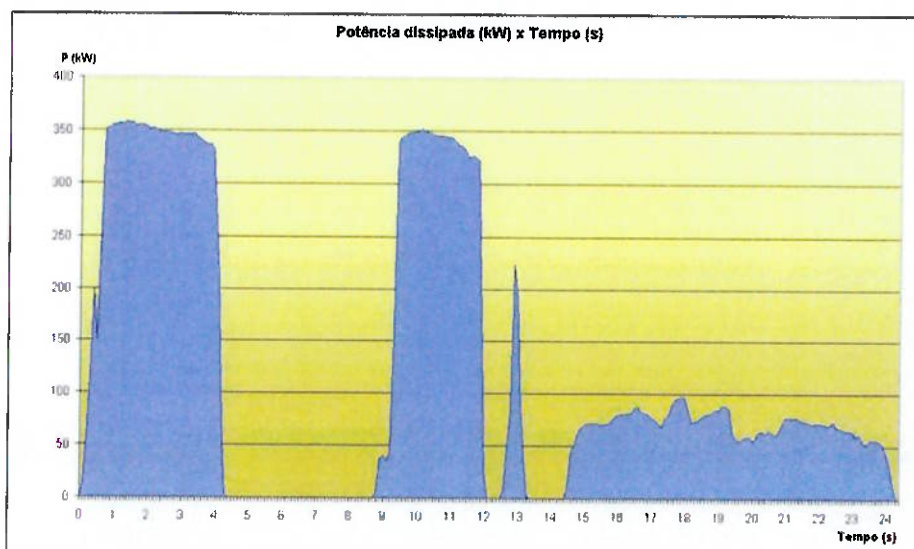
O resultado obtido em MODO MCS, não representa a situação operacional no quesito desempenho. Nos testes nesta modalidade as taxas de aceleração e

frenagem diferem daquelas impostas pelo sistema ATC quando da operação na modalidade automática (MODO ATO). A modalidade de operação na via comercial é automática (MODO ATO), e nesta modalidade a taxa de frenagem é menor, a qual permite parar nas estações suavemente.

A via de teste possui duas estações nas quais é possível fazer a parada programada, a abertura de portas e a comunicação entre trem e estação de forma idêntica à via comercial. Com a alimentação elétrica da via de teste isolada das demais vias do pátio, foram realizadas corridas na modalidade ATO entre as duas estações com a regulagem do TAP na posição B.



**Figura 5.5 – Gráfico da Potência dissipada em ATO – TAP B**



**Figura 5.6 – Gráfico da Potência dissipada em ATO – TAP A**

Com o comutador de TAP na posição A, foi verificado que houve uma diminuição de 5,78% da energia dissipada na frenagem em relação à posição B.

Uma diminuição da dissipação em valores relativos era esperada, pois a taxa de frenagem em ATO é menor que a taxa de frenagem máxima imposta nos testes realizados na modalidade MCS. Nos testes na via 61 foi observado que houve uma dissipação de energia maior na modalidade ATO em comparação à modalidade MCS, independentemente da posição do comutador de TAP. Os valores obtidos foram em média, maiores que o dobro da energia dissipada em MCS.

A diminuição da energia dissipada não se deu de maneira uniforme desde o início da frenagem até a parada do trem. Para melhor analisar este comportamento, dividiu-se a frenagem em 2 estágios:

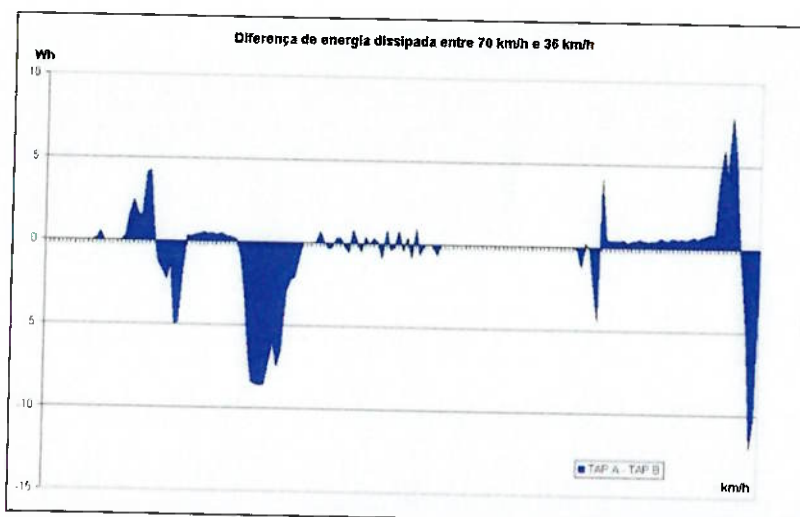
- Velocidade entre 70 km/h e 36 km/h
- Velocidade entre 35 km/h e 0 km/h

**Tabela 5 - Energia dissipada em ATO – Via 61**

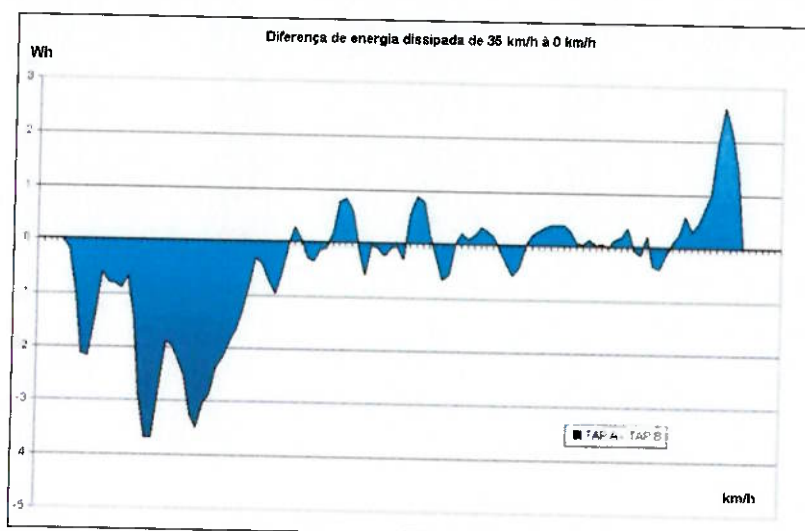
	70km/h a 36km/h	35km/h a 0km/h	TOTAL
TAP B*	569,66	186,53	756,19
TAP B*	574,14	248,79	822,93
TOTAL*	1143,80	435,31	1579,11
TAP A*	548,63	197,97	745,92
TAP A*	548,60	193,25	741,85
TOTAL*	1097,23	391,22	1487,77
Diferença %	4,07	10,13	5,78

\* Valores em Wh





**Figura 5.7 - Diferença de energia dissipada (TAP A-TAP B) 70 km/h a 36 km/h**



**Figura 5.8 - Diferença de energia dissipada (TAP A-TAP B) entre 35 km/h e 0 km/h**

As medições indicaram que a alteração de TAP proporcionou uma redução da energia dissipada nas resistências, proporcionalmente maior em velocidades mais baixas. Na Tabela 7 tem-se as velocidade médias na operação comercial da Linha 3 - Vermelha.

**Tabela 6 – Velocidade média\* em operação comercial – Linha 3 – Vermelha**

<b>Horário de Pico - Manhã</b>	<b>32,3 km/h</b>
--------------------------------	------------------

Horário de Pico - Tarde	36,4 km/h
Horário de Vale	41,9 km/h

\* Dia útil, sem imposição de Baixa Aderência.

### 5.3 Operação comercial

Com os resultados obtidos no ambiente controlado, a próxima etapa foi verificar o comportamento dinâmico da frenagem no ambiente real. Para tal, instrumentou-se um trem Cobrasma e registrou-se os mesmos sinais que haviam sido coletados nos testes na via 61. Os registros se deram em duas etapas. Na primeira etapa o objetivo foi estimar a quantidade de energia dissipada nas resistências durante o horário de pico e posteriormente no horário de vale.

#### 5.3.1 Horário de “pico”

Os registros no horário de pico se deram no período da manhã. Foram registrados vários dias, mas para os cálculos foi considerado o resultado da medição do dia 01/03/2007. A escolha se deu em função da inexistência de ocorrências operacionais relevantes nesta data. Para os cálculos foi utilizado como base o “Programa de Oferta de Trens – POT” para os dias úteis.

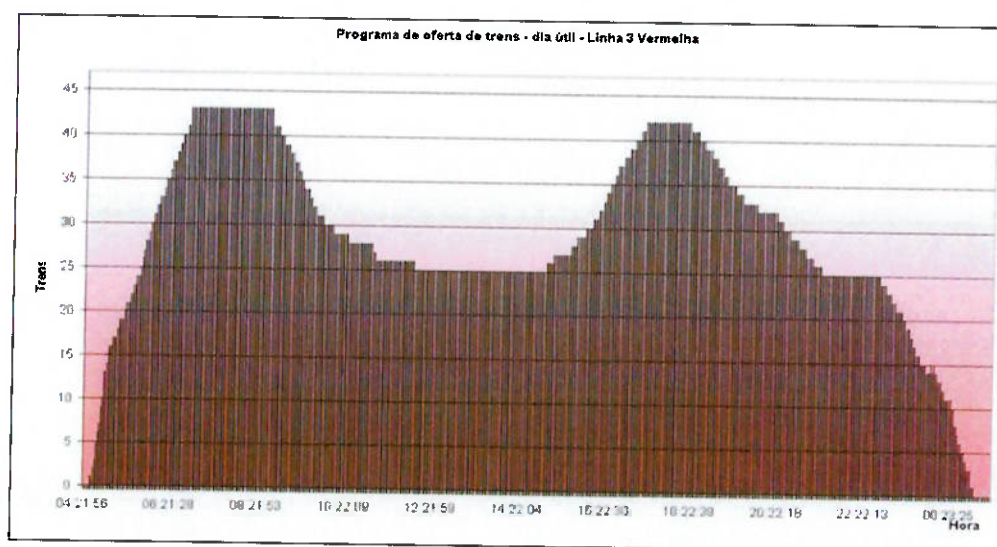


Figura 5.9 – Programa de oferta de trens – L-3 Vermelha

A energia dissipada nas resistências foi de 0,14 kWh por carro, o que equivale a 0,83 kWh por trem (0,14 kWh vezes 6 carros). No horário das 06h45min às 08h30min circulam 43 trens (chamado de “pico da manhã”), e no período entre e 17h15min e 18h15min circulam 42 trens. Estimando-se que cada trem dá em média 2,24 voltas no pico (dividiu-se o tempo total do pico pelo tempo de volta), e multiplicando-se o total de trens no pico pelo número médio de voltas temos o total de 494,99 kWh dissipada nas resistências.

Esta situação é a de menor criticidade em termos de dissipação, pois estamos operando com o sistema a plena carga. No horário de maior demanda, a criticidade está no limite inferior de tensão, pois a diminuição do nível de tensão de alimentação pode comprometer o desempenho do material rodante (através da diminuição do esforço trativo), ou até mesmo provocar o desligamento do sistema de propulsão.

Os valores medidos de tensão de linha durante o pico oscilaram entre 660,74 V e 877,29 V, com média de 789,76 V. A menor tensão foi registrada no trecho entre CAR-1 e TAT-1 às 07h36min. Os valores obtidos encontram-se acima do limite inferior determinado pelo sistema de tração.

Recomenda-se a realização de medições considerando a falta de uma subestação retificadora, pois esta situação é a que apresenta maior grau de criticidade, tendo em vista que o nível de tensão num determinado ponto do terceiro trilho, depende da distância deste em relação à subestação.

Na falta da subestação primária de Patriarca, em função da existência de rampa de 4%, é imposta a condição de limitação de potência pela operação. A limitação de potência consiste na diminuição da taxa de aceleração do material rodante.

### **5.3.2 Horário de “vale”**

Com base na estratégia operacional de oferta de trens nos dias úteis, excluindo-se os horários de pico, calculou-se a média de trens que circulam nestes dias. O resultado foi 27 trens. Este é o número de composições que circulam aos sábados



no período entre 10h07minh e 19h04minh, desta forma, a estratégia adotada para verificar a energia dissipada nos horários fora dos picos foi fazê-la neste dia.

A medida da energia dissipada em uma volta foi de 4,99 kWh por carro, totalizando 29,94 kWh por trem (4,99 kWh vezes 6 carros). Tendo-se como base o número de 27 trens em circulação, estimou-se a energia dissipada pela frota:

$$27 \text{ trens} \times 29,94 \text{ kWh} = 808,38 \text{ kWh}$$

O tempo que a frota circula, no dia útil, excetuando-se os horários de picos (manhã e tarde), é 1065 minutos. O tempo de volta medido foi 68,7 minutos. O número estimado de voltas que um trem completa por dia (com exceção dos horários de picos) foi obtido dividindo-se o tempo em operação comercial (fora dos horários de picos – 1065 minutos) pelo tempo de volta medido, totalizando 15,5 voltas. Obtêm-se a energia dissipada nas resistências, multiplicando-se o número de voltas pela energia dissipada pela frota, totalizando 12,53 MWh.

Os valores medidos de tensão de linha durante o vale oscilaram entre 681,49 V e 895,65 V, com média de 810,84 V.

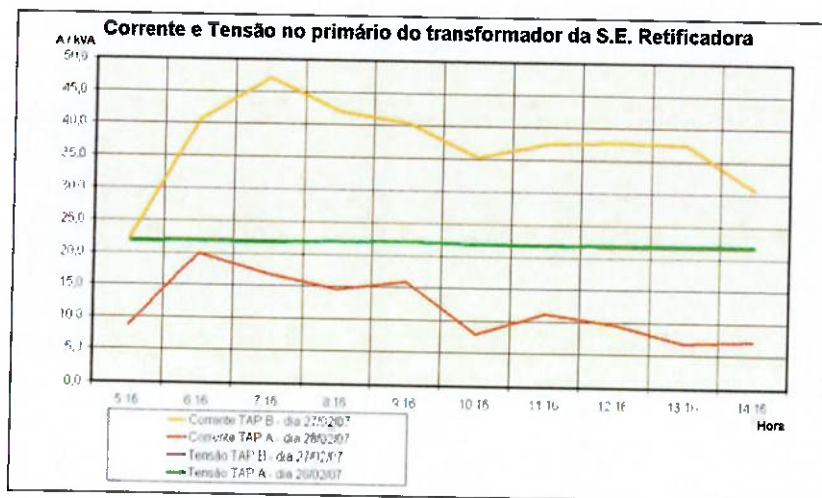
O resultado obtido indicou que a alteração do nível de tensão nas subestações retificadoras ao longo da linha, poderá proporcionar uma diminuição na dissipação de energia nas resistências do material rodante, uma vez que a maior parte do dia o sistema opera sob tensões médias mais altas, em virtude da diminuição da oferta de trens.

### **5.3.3 Medições nas subestações retificadoras**

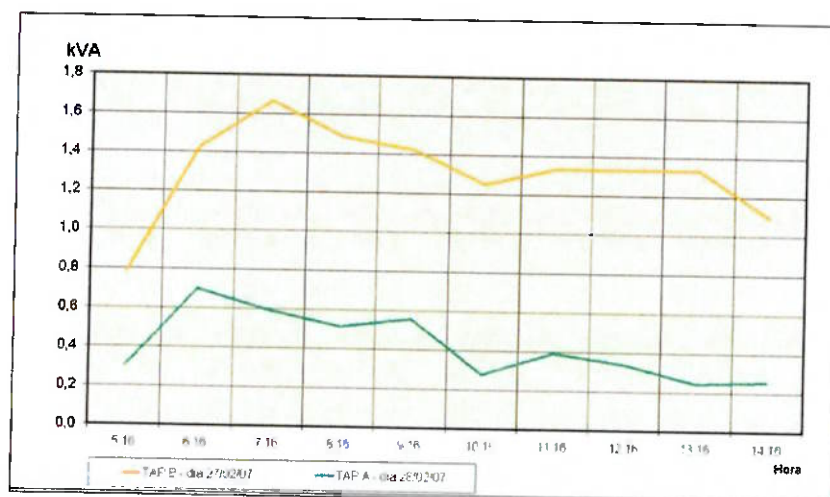
O TAP foi alterado de B para A na subestação retificadora de Vila Matilde.

As medições de tensões e correntes fornecidas pela subestação retificadora de Vila Matilde (VTD), foram executadas com o uso do Analisador de Redes AR.4 MP fabricado pela Circutor durante os meses de fevereiro e março do corrente ano. O comutador de TAP foi alterado em várias ocasiões durante este período, proporcionando comparações entre vários dias e situações.

Os dados obtidos mostraram que o comportamento ao longo do tempo da corrente do primário do transformador, foi muito semelhante para ambos os TAPs, diferindo apenas em relação às amplitudes. Com o comutador de TAP na posição A observou-se um decréscimo acentuado no valor da corrente fornecida pela subestação retificadora de Vila Matilde.



**Figura 5.10 – Gráfico de corrente e tensão na S.E. de V. Matilde (VTD)**



**Figura 5.11 – Gráfico da Potência Fornecida – S.E. de V. Matilde (VTD)**

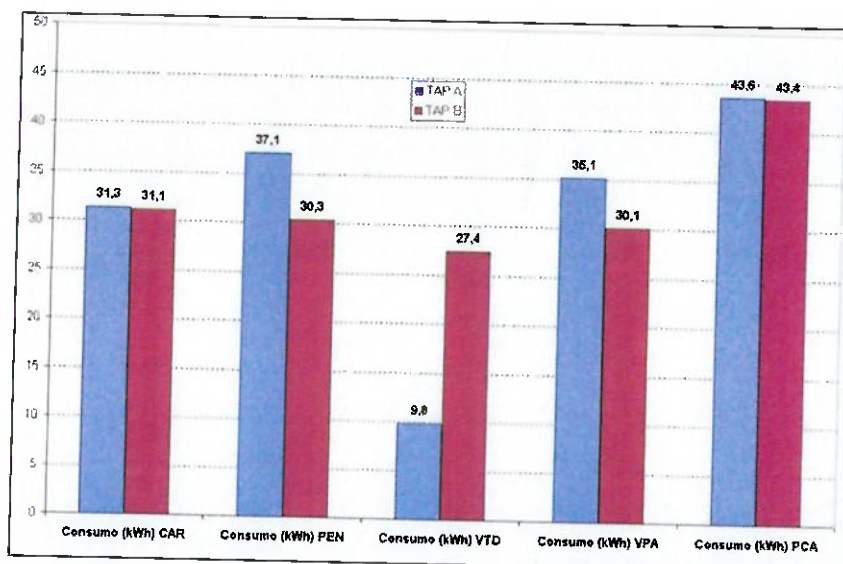
Observou-se a distribuição da energia fornecida pelas subestações aos trens, através do registro do consumo de energia medido nas subestações retificadoras durante todo o mês de março de 2007.

Nas 5 estações sequencialmente escolhidas (Carrão, Penha, Vila Matilde, Vila Esperança e Patriarca), foram registradas as leituras obtidas nos medidores instalados nos painéis de controle e proteção do sistema de alimentação elétrica de 22kV.

**Tabela 7 – Consumo medido no trecho Carrão - Patriarca**

Dia	01/03/07	15/03/07	28/03/07	29/03/07
	Qui	Qui	Qua	Qui
TAP	A	A	B	B
Passageiros Transportados	1228264	1238961	1232035	1210235
Num. Viagens	1026	1030	1032	1030
Diário Operacional	Sem ocorrências relevantes	Sem ocorrências relevantes	Sem ocorrências relevantes	Sem ocorrências relevantes
Consumo (kWh) CAR	30,2	31,3	31,1	31,5
Consumo (kWh) PEN	35,7	37,1	30,3	30,5
Consumo (kWh) VTD	8,6	9,8	27,4	27
Consumo (kWh) VPA	34,7	35,1	30,1	31,2
Consumo (kWh) PCA	41,3	43,6	43,4	44
Consumo trecho (kWh)	150,5	156,9	162,3	164,2

A metodologia adotada (medição em 5 subestações seqüenciais) permitiu observar o efeito da alteração do TAP imposta na subestação de Vila Matilde (VTD) nas adjacentes. O aumento da energia consumida pelas subestações Carrão (CAR) e Patriarca (PCA) foi pequeno em relação ao observado nas subestações Penha (PEN) e V. Esperança (VPA).



**Figura 5.12 – Gráfico Consumo TAP A x TAP B – S.E. Retif. VTD e adjacentes**

De posse dos registros da energia consumida, foi realizada uma pesquisa nos diários operacionais (documento emitido diariamente pela Gerência de Operações, no qual consta o resumo da operação do dia), com o objetivo de estabelecer uma correlação entre as medições e a situação operacional nos dias analisados. Foram considerados as variáveis que pudessem influenciar no consumo de energia dos trens: número passageiros transportados, número de viagens realizadas, ocorrências operacionais e ocorrências de baixa aderência.

Comparando-se o dia 15/03/07 (TAP "A") com o dia 29/03/07 (TAP"B"), encontramos uma economia no consumo de energia de 4,4%. Cabe ressaltar que neste dia 15/03, foram transportados 28.726 passageiros a mais que no dia 29/03.

Em horário de pico foram também registrados os picos de corrente dos amperímetros dos painéis de controle e proteção do 22kV que no pior caso, Subestação de PCA, foi de 180 A. O valor médio nominal de 30 A nos horários de pico da operação comercial.

## **5.4 Aceleração**

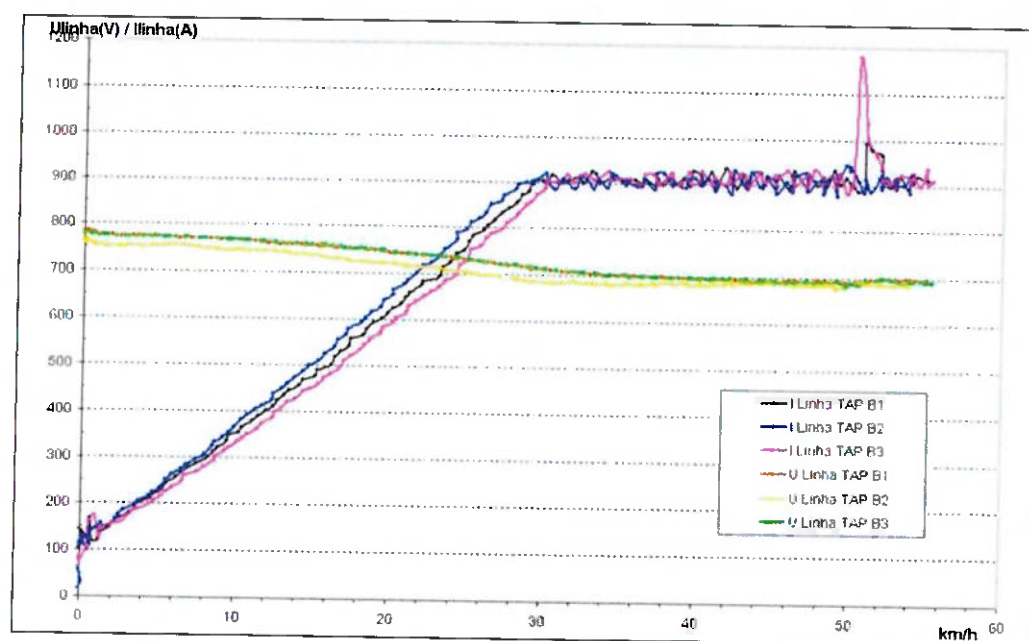
O resultado obtido na operação comercial (diminuição da energia consumida de 4,4%) foi maior que o observado nos testes de frenagem em ambiente controlado.

Esta constatação suscitou o questionamento se esta diferença seria proveniente de uma economia na aceleração.

Através da análise dos dados anteriormente obtidos, observou-se que a economia se dava também na aceleração.

Novos registros foram realizados em ambiente controlado visando à ampliação da base de dados. As figuras 5.13, 5.14 e 5.15 representam 3 corridas válidas com o comutador de TAP na posição B e 3 com o comutador na posição A. Entenda-se por corrida válida aquela que não houve interferência externa (falha de propulsão em algum carro, variação da demanda de tração ou ocorrência no sistema ATC) durante a aceleração no intervalo de 0 a 59 km/h.

Nestes registros foi verificado que a redução no consumo de energia na aceleração foi em torno de 3,9% na modalidade ATO entre 0 km/h e 59 km/h.



**Figura 5.13 – Corrente e tensão de linha (TAP B) de 0 a 60 km/h**



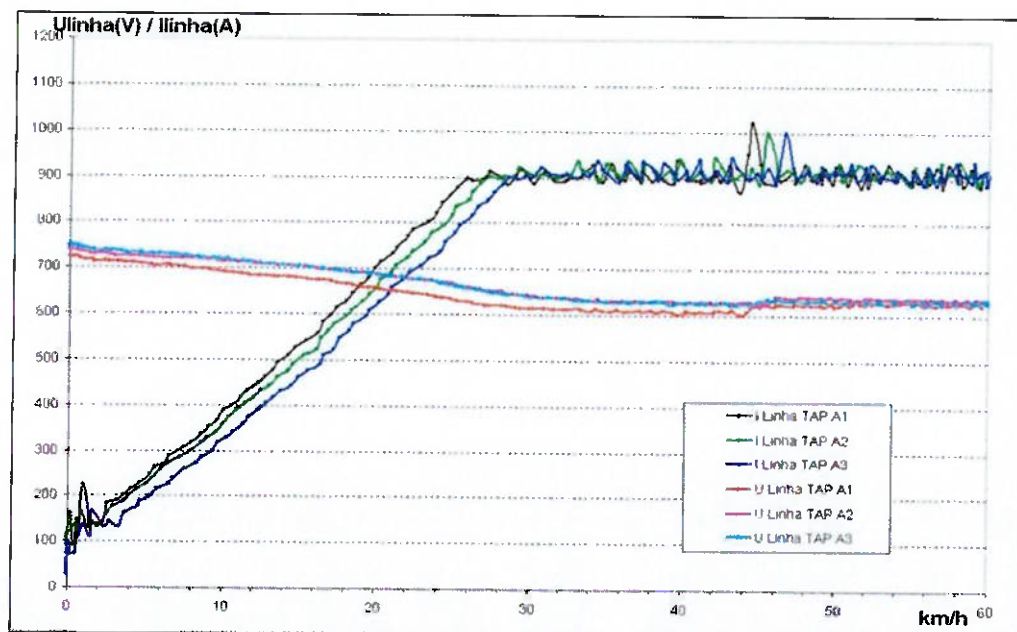


Figura 5.14 – Corrente e tensão de linha (TAP A) de 0 a 60 km/h

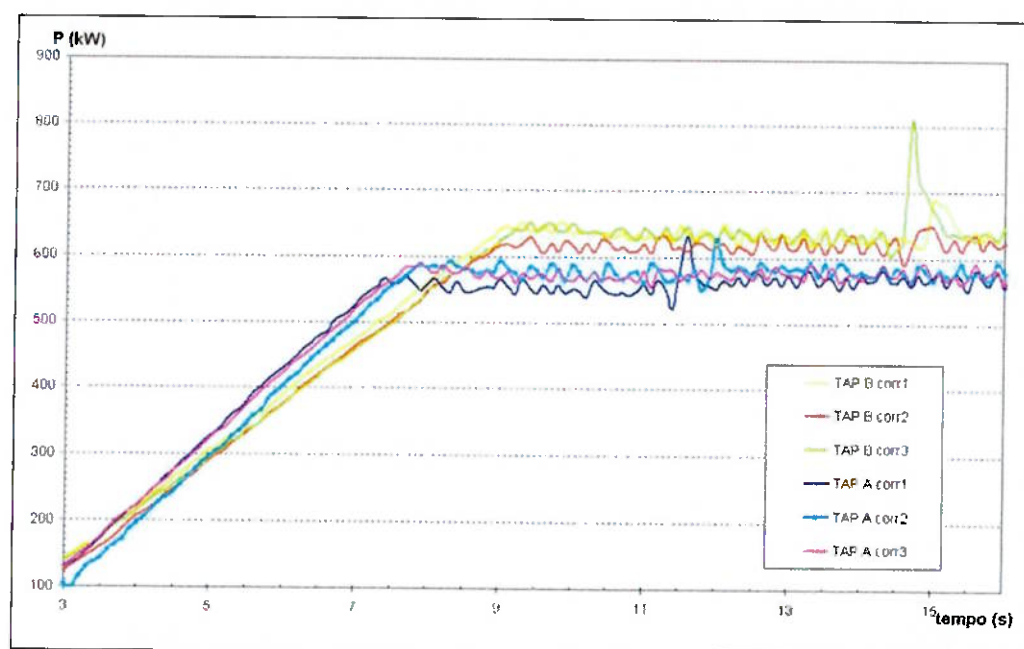
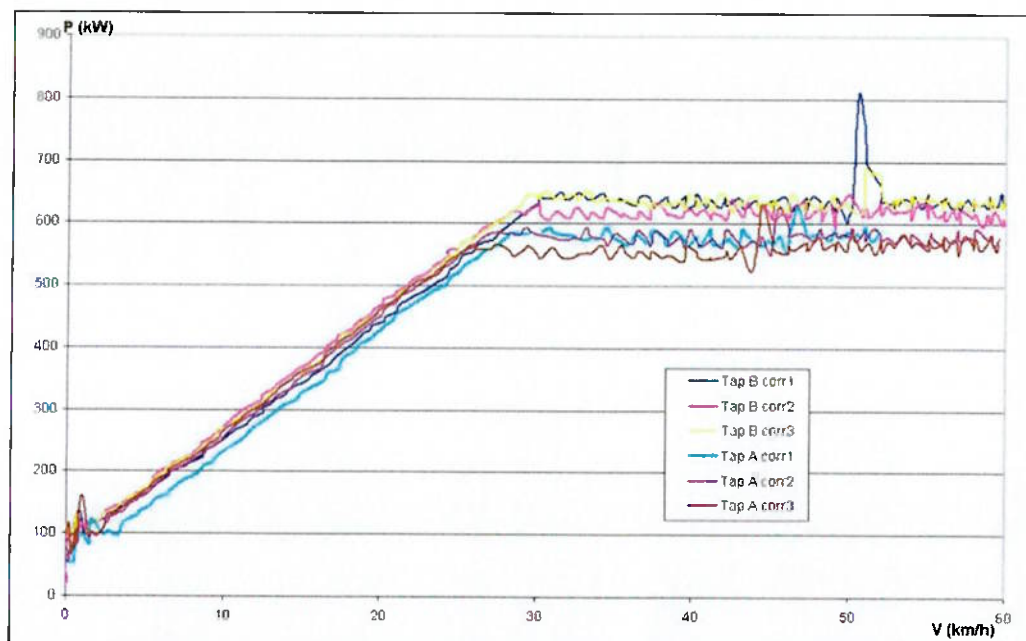


Figura 5.15 – Potência consumida na aceleração TAP B e TAP A



**Figura 5.16 – Potência consumida na aceleração x velocidade**

Integrando-se a potência em relação ao tempo na figura 5.15 temos:

**Tabela 8 – Consumo de energia na aceleração**

<b>Energia consumida</b>	<b>3 a 7,5s</b>	<b>7,6 a 16s</b>
TAP B corr1 (Wh)	7491,52	62441,92
TAP B corr2 (Wh)	7295,00	59552,05
TAP B corr3 (Wh)	7735,60	62825,83
<b>Σ TAP B</b>	<b>22522,12</b>	<b>184819,79</b>
TAP A corr1 (Wh)	8091,92	58290,97
TAP A corr2 (Wh)	7292,88	58724,95
TAP A corr3 (Wh)	8130,33	56587,32
<b>Σ TAP A</b>	<b>23515,13</b>	<b>173603,24</b>
<b>Diferença (%)</b>	<b>+4,41</b>	<b>-6,07</b>

## 5.5 Efeitos na qualidade da energia

### 5.4.1 Potencial Negativo-Terra

Com o objetivo de verificar os efeitos que a alteração de TAP provoca no sistema de proteção de Negativo-Terra das estações, foram executadas medições de diferença de potencial (DDP) entre TE e TV nas estações Vila Matilde (VTD), a qual teve seu TAP alterado, e Penha (PEN). No dia 12/03/07 a medição foi realizada no transformador retificador de Vila Matilde (VTD) sem a alteração do TAP, e no dia 13/03/07 a medição foi realizada no mesmo transformador retificador, com a alteração do TAP (foi alterado o TAP da posição B para a posição A).

Foram utilizados dois aparelhos Scopemeter modelo 97 do fabricante Fluke. Foi utilizada a função "Registrador" do Scopemeter para monitorar os seguintes períodos:

- horário de pico do período da manhã;
- horário de vale (entre pico do período da manhã e pico do período da tarde);
- horário entre início do pico do período da tarde e início do pico do período da manhã.

Nas medições de tensão em corrente contínua, foi observado que diferença de potencial entre T.E. e T.V. está diretamente relacionada à energia fornecida pela Subestação Retificadora, ou seja, quanto maior a corrente solicitada pelos trens maior era a D.D.P. entre T.E. e T.V.



Tabela 9 – Medições da d.d.p. entre T.E. e T.V.

DDP EM VOLTS ENTRE TERRA DA ESTAÇÃO (TE) E TERRA DA VIA (TV)						
TAP		TAP NA POSIÇÃO B		TAP ALTERADO DA POSIÇÃO "B" PARA "A"	TAP ALTERADO PARA "A"	
DESCRIÇÕES/DATAS		12/03/2007		ENTRE 12/03/2007 E 13/03/2007	13/03/07	
VTD	INÍCIO	06h45min	08h46min	15h08min dia 12/03/2007	07h03min	08h37min
	FIM	08h45min	15h07min	06h57min dia 13/03/2007	08h36min	14h47min
	VALOR MÁXIMO	+ 81,2	+ 68,3	+ 82,8	+ 71,7	+ 71,0
	VALOR MÉDIO	+ 18,1	+ 17,5	+ 12,4	+ 25,5	+ 24,1
	VALOR MÍNIMO	- 14,4	- 14,2	- 17,9	- 9,0	- 13,2
PEN	INÍCIO	07h36min	09h02min	15h20min dia 12/03/2007	06h46min	08h54min
	FIM	09h01min	15h19min	06h40min dia 13/03/2007	08h53min	15h15min
	VALOR MÁXIMO	+ 82,3	+ 74,2	+ 68,8	+ 75,9	+ 74,6
	VALOR MÉDIO	+ 19,9	+ 17,7	+ 11,7	+ 20,2	+ 19,6
	VALOR MÍNIMO	- 10,2	- 17,6	- 20,1	- 12,8	- 18,0

Observa-se que os valores medidos nas duas estações estão próximos e estão dentro da faixa de regulação dos relés de sobretensão Negativo-Terra. A alteração do TAP em V. Matilde causou pequena variação na estação adjacente (PEN), indicando que não são necessárias alterações na regulação do sistema de supervisão do potencial Negativo-Terra.

#### 5.4.2 Harmônicos

A possibilidade da alteração de TAP, provocar uma alteração no nível de harmônicos nas tensões envolvidas no estudo foi verificada.

A metodologia utilizada para a análise, se deu através da realização de medições de formas de onda de tensão em dois pontos distintos.

No pátio Itaquera, com a alimentação da via de teste isolada das demais e com um trem tracionando com taxa de aceleração máxima ( $1,12 \text{ m/s}^2$ ) em duas situações distintas: Subestação Retificadora com o TAP de seu transformador em posição normal de trabalho (TAP B) e Subestação Retificadora com TAP em "A".

Os resultados obtidos não apresentaram variações significativas. Caso a alteração dos TAPs dos transformadores seja considerada viável para todas as subestações retificadoras da Linha 3, novas medições de harmônicos são recomendadas para esta retificadora, pois se acredita que um número maior de amostras e equipamentos mais apropriados para este tipo de medição possam indicar com maior precisão a real situação relativa à qualidade da energia fornecida.

## 6 CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi estudar a influência do nível de tensão de saída das subestações retificadoras sobre o consumo de energia dos metrocarros. Os resultados obtidos indicaram que a redução do nível de tensão de linha, através da alteração da relação de transformação do transformador da retificadora, proporciona uma redução na dissipação de energia nas resistências de frenagem do material rodante, permitindo que uma parcela maior da energia regenerada seja devolvida à rede.

Os resultados indicaram que nas acelerações, a redução do nível de tensão de linha proporciona uma redução no consumo de energia. A redução se dá devido à característica do circuito de controle de tração, pois o controle do nível de corrente é diretamente proporcional à carga. A tensão da linha é determinante nas velocidades mais altas, pois a redução de tensão passa a comprometer a performance do sistema de tração quando é atingida a frequência máxima de operação do chopper.

É corrente, que as tensões de saída das retificadoras devem ser mantidas acima da nominal do sistema para que seja obtida a tensão nominal na maior extensão possível da linha, ou no ponto mais distante da geração, porém esta afirmação necessita ser analisada com maior abrangência.

O estudo mostrou que é importante considerar-se o contexto operacional em que está inserida a subestação retificadora, o intervalo mínimo entre trens (headway), carregamento, distâncias entre subestações, perfil de via e condições de restrição (falta de uma subestação adjacente), para a determinação do nível de tensão de saída da subestação retificadora.

Foi possível estimar a diferença da energia dissipada durante um dia útil, entre os horários de pico e vale, e o resultado indicou que a alteração de TAP, se implantada ao longo da via, proporcionará resultados positivos na dissipação de energia em forma de calor. Tendo em vista que na maior parte do dia, nos finais de semana e feriados, o sistema opera sob tensões médias mais altas, em virtude da diminuição da oferta de trens.

Os resultados obtidos indicam que a diminuição do nível de tensão de linha em 5%, proporciona maior redução da energia dissipada nas resistências durante as frenagens, para velocidades abaixo de 40 km/h.

O objetivo de se identificar o melhor ajuste do nível de tensão de saída, através de medições de desempenho do material rodante e de dissipação de energia, não foi atingido na plenitude, uma vez que não foi possível diminuir ainda mais a tensão de linha através dos comutadores de TAPs, pois estes estavam posicionados na penúltima escala, oferecendo assim um único patamar de alteração.

Não houve comprometimento da taxa de aceleração dos trens, com a alteração de TAP na modalidade MCS. Na modalidade ATO os resultados não foram conclusivos, pois com o TAP na posição A a taxa de aceleração foi ligeiramente menor. Mais testes são recomendados para ampliar a base de dados antes de implementar-se as alterações propostas.

O impacto da alteração proposta sobre o consumo de energia de tração, seria melhor avaliado caso fosse possível promover a alteração dos TAPs simultaneamente em todas as subestações retificadoras de um determinado trecho de via alimentado por uma mesma subestação primária, porém esta condição não pode ser avaliada, devido restrições impostas pela Operação.

Concluiu-se que a energia dissipada nas resistências, na frota A48 – Linha 5 – Lilás, a qual possui sistema de tração em CA, foi quantitativamente próxima à da frota Cobrasma.

A circulação de corrente no trilho de rolamento ocasiona o surgimento de diferenças de potenciais entre terras (TV e TE). A alteração de TAP não evidenciou a necessidade de intervenções ou ajustes no sistema de proteção ao usuário, uma

vez que a variação da corrente foi inferior à regulação atual do sistema de proteção. O aumento da corrente consumida pela subestação retificadora, em função da alteração dos TAP, não compromete a operação do sistema, em virtude do dimensionamento dos cabos de alimentação.

Constatou-se que, na condição de diferença de potencial entre subestações, as subestações vizinhas são responsáveis pela maior parte do suprimento de energia no trecho, e a distribuição da carga entre elas não é linear. Não foi possível observar, devido restrições operacionais, o comportamento do anel de 22kV na falta de uma subestação completa.

Caso a alteração dos TAPs dos transformadores seja considerada viável para todas as subestações retificadoras da Linha 3, novas medições de harmônicos são recomendadas para esta retificadora, pois se acredita que um número maior de amostras e equipamentos mais apropriados para este tipo de medição possam indicar com maior precisão a real situação relativa à qualidade da energia fornecida.

Os dados obtidos podem ser úteis na avaliação da relação custo-benefício de sistemas acumuladores de energia embarcados ou não.

Na Linha 3 - Vermelha os TAPs de todos os transformadores do grupo retificador estão padronizados na posição B. Recomenda-se a realização de estudo visando adequar os TAPs ao contexto operacional, identificando o melhor valor de tensão a ser fornecida por cada subestação retificadora ao longo da linha.

A diminuição da energia dissipada na frenagem proporciona:

- Melhoria no nível de conforto dos usuários (o calor gerado pela dissipação desta energia de frenagem "excedente", provoca um aumento na temperatura ambiente no túnel);
- Diminuição do tamanho do conjunto de resistências embarcado no material rodante, proporcionando economia de energia pela diminuição da massa transportada;
- Melhoria do desempenho do sistema de ventilação dos túneis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALOUCHE, Peter **A Regeneração e a Recuperação de Energia por Onduladores no Metrô de São Paulo**. Em SEMINÁRIO SOBRE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA DE TRAÇÃO ELÉTRICA POR ONDULADORES, março, 1986.

ARGENTON, Luiz E., BARBOSA, Sergio, HAGA, Albert – **Viabilidade da Aplicação do Monitoramento Contínuo nos Sistemas de Máquina de Chave e Proteção da Sobretensão do Negativo-Terra**, 2004.

BINGHAM, Richard P. **HARMONICS - Understanding the Facts - Part 2**. Anais electrónicos... Disponível em: <<http://edi-main.dranetz-bmi.com/dbmisite12-01/pdf/harmonicspart2.pdf>>. Acessado em: 27 Abril 2007.

CIRCUTOR - **Manual de Instruções para utilização do Analisador de Redes tipo AR.4 MP** – Espanha, 1997.

COBRASMA - **Diagramas elétricos do Sistema de Propulsão**, 1984.

COBRASMA - **Manual de Manutenção e Operação** – Ref. 2247, 2216 (Volumes 1, 2 e 3), 1984.

CPTM - **Especificação Técnica de Material Rodante Linha Capão Redondo – Largo Treze** – Ref. CPTM AB4060-2

FLUKE – 93/95/97 50 MHz Scopemeter – **Manual de uso** – ref.930817

IEEE Std 519-1992. IEEE Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. Piscataway, 1992.

IEEE Task Force. **Effects of Harmonic on Equipament** – IEEE Transaction on Power Delivery. Vol 8, N.2, pp 672-680, April, 1993.

IGARASHI, Miguel Y.; MARTINS, Edivaldo W.; RAMOS, Adalberto P. – **Estudo para A Racionalização da Energia Elétrica Consumida nos Trens do Metrô de São Paulo**, 2004.

LAUDANNA, Atilio H. **Regeneração ou Cogeração**. Revista Engenharia n° 536, 1999.

**METRÔ SP- Configuração do Sistema de Alimentação Elétrica da Linha 3 – Vermelha** – código de referência MTC 2AG001053.

**METRÔ SP- Configuração do Sistema de Alimentação Elétrica do Pátio de manutenção de Itaquera(PIT).**

**METRÔ SP- Equipamentos das Subestações Retificadoras. Linha 4 – Amarela, trecho Morumbi-Luz,** Cód. CS-4.81.02.XX/300-001, 2002.

**METRÔ SP- Especificação Técnica para contrato de fornecimento de trens para linha LESTE/ OESTE,** Cód. ET-3.86.01.00/300-003, 1978.

**METRÔ SP- Transformador para Grupos Retificadores** – código de referência EE – 3.81.02.XX/04-001.

**METRÔ SP- Treinamento em Restabelecimento do Sistema de Retificadoras da Linha 3 – Vermelha.**

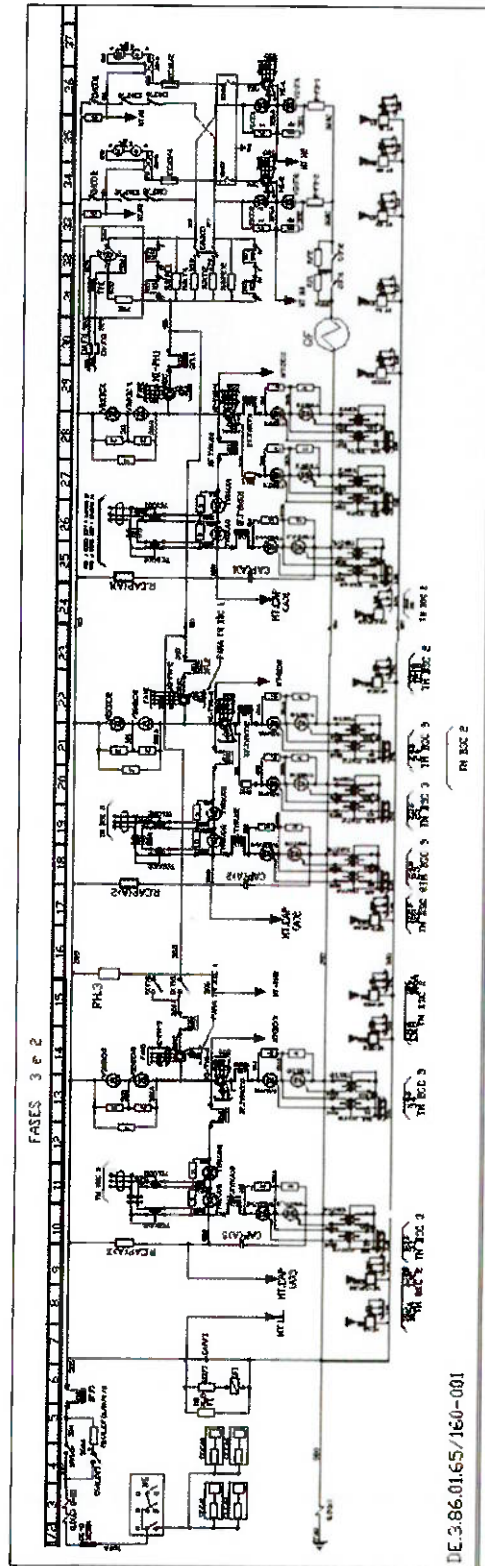
**NATIONAL INSTRUMENTS - LabVIEW – Getting Started with LabVIEW,** Evaluation Version 7.0 – 2003.

**ROCHA, José Antonio Meira da. Modelo de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).** Modelo de documento digital do programa MSWord disponível em <[http://www.meiradarocha.jor.br/uploads/1021/196/modelo\\_de\\_projeto\\_de\\_TCC-2006-06-12a.doc](http://www.meiradarocha.jor.br/uploads/1021/196/modelo_de_projeto_de_TCC-2006-06-12a.doc)>. Acesso em: 12 jun. 2006.

**RODRIGUES, Ricardo M., SERNI, Paulo J. A., RODRIGUES, José F. et al. Qualidade de energia em instalações elétricas rurais.** Em: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. Anais electrónicos... Disponível em:<[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022000000100040&lng=es&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000100040&lng=es&nrm=abn)>. Acessado em: Abril 2007.

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, Escola Politécnica. Divisão de Biblioteca - Diretrizes para apresentação de dissertações e teses** 3. ed. - São Paulo 2006.

## ANEXO A –ESQUEMA DE POTÊNCIA – COBRASMA





# Anexo B – SISTEMA ELÉTRICO LINHA 3 (PARCIAL)

CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO (PARCIAL) – LINHA 3 – VERMELHA

