

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DANIEL CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE**

**Análise da eficácia do freio regenerativo dos trens na redução do consumo de  
energia da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos**

**São Paulo**

**2016**

**Daniel Cavalcanti de Albuquerque**

**Análise da eficácia do freio regenerativo dos trens na redução do consumo de energia da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos**

Monografia apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de especialista em Tecnologia MetroFerroviária.

Área de concentração: Engenharia elétrica.

**Orientador: Prof. Dr. Ivan Chabu**

**São Paulo**

**2016**

#### Catálogo-na-publicação

Albuquerque, Daniel Cavalcanti de

Análise da eficácia do freio regenerativo dos trens na redução do consumo de energia da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos / D. C. Albuquerque -- São Paulo, 2016.

89 p.

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

1.Frenagem Regenerativa 2.Inversor de Tração 3.Tração Elétrica 4.Subestações I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos Professores Doutores das disciplinas do curso TMF pelo tempo e disposição dedicados a disseminar conhecimentos.

A Companhia Paulista de Trens Metropolitanos pela oportunidade investida no desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao Prof. Dr. Ivan Chabu pela oportunidade, apoio e incentivo na condução deste trabalho.

Aos companheiros de empresa pelo apoio prestado durante a pesquisa, através de material técnico, diálogos e discussões acerca do assunto, ajudando no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus familiares por compreender e incentivar, cientes da importância profissional que esse trabalho demanda e requer.



## RESUMO

ALBUQUERQUE, D.C. **Análise da eficácia do freio regenerativo dos trens na redução do consumo de energia da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos.** 2016. 60p. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Tecnologia Metroferroviária) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

O freio regenerativo dos trens operacionais da CPTM é responsável por significativa redução do consumo de energia elétrica da empresa. Esta tecnologia aplicada nos trens com motores em corrente alternada, com o auxílio de um inversor de frequência, possibilita durante a desaceleração da composição, gerar energia elétrica nos motores de tração, realimentando o próprio trem e devolvendo essa energia à rede aérea, contribuindo com a energização de outros trens em circulação. O gasto com energia elétrica no sistema de tração está entre os três maiores custos da empresa. Reduzir o consumo desta energia significa diminuir o custo operacional, além de gerar menor impacto ambiental. O motivo deste trabalho é a comprovação da redução no consumo de energia elétrica com a utilização do sistema regenerativo nas diversas frenagens impostas aos trens que circulam nas linhas da malha ferroviária. Através do monitoramento com trens operacionais em horários e carregamentos diversos, com paradas e partidas nas estações, foi possível medir a energia da frenagem regenerativa. A contribuição da regeneração de energia vai além da economia na redução do consumo elétrico, pois a utilização da frenagem eletrodinâmica aumenta a vida útil do sistema de freio de atrito, economizando pastilhas e discos de freio.

Palavras-chave: 1 Frenagem Regenerativa. 2 Inversor de tração. 3 Tração Elétrica. 4 Subestações.

## **ABSTRACT**

ALBUQUERQUE, D.C. **Efficiency Analysis of the regenerative braking of trains in reducing energy consumption at Companhia Paulista de Trens Metropolitanos.** 2016. 60p. Monography (Final Course Text in Subway and Railway Technology) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

The regenerative braking of the trains operating at CPTM is responsible for a significant reduction in energy consumption of the company. This technology applied to trains with alternating current motors, with the assistance of a traction inverter enables during deceleration of the composition, to generate electricity by the traction motors, feeding the train itself and returning this energy to the DC-bus, contributing to the energization of other trains in circulation. Expenditure on electricity in the traction system is among the top three company costs. Reducing the consumption of energy means lower operational costs and generate less environmental impact. The reason of this work is to demonstrate the reduction in power consumption with the use of regenerative system in the various brakings imposed to trains circulating on rail network lines. Through monitoring with operating trains at various times and loads, with stops and starts in the stations, it was possible to measure the energy of regenerative braking. The energy regeneration contribution goes beyond the economy on reducing power consumption because the use of electrodynamic braking increases the useful life of the friction brake system, saving pads and brake discs.

Keywords: 1 Regenerative Braking. 2 Traction Inverter. 3 Electric Traction. 4 Substations.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Disposição da rede aérea de tração .....	19
Figura 2 - Ilustração de uma subestação retificadora para fornecimento de energia aos trens.....	21
Figura 3 - Diagrama simplificado de um retificador de potência da linha 8 .....	22
Figura 4 - Representação da Potência Instalada atual x plano de expansão.....	26
Figura 5 - Foto do pantógrafo AM57BU .....	27
Figura 6 - Ilustração dos equipamentos de alta tensão.....	29
Figura 7 - Ilustração do sistema de frenagem do trem.....	30
Figura 8 - Ilustração do sistema de frenagem elétrica.....	31
Figura 9 - Ilustração do sistema de frenagem mecânica com freio de atrito .....	31
Figura 10 - Ilustração de um truque motor e o sistema de freio de atrito .....	32
Figura 11 - Distribuição de energia no trem .....	34
Figura 12 - Diagrama de blocos representando o circuito do conversor auxiliar .....	35
Figura 13 - Curva característica Conjugado x Velocidade de um motor de indução trifásico.....	37
Figura 14 - Ilustração do motor de tração .....	38
Figura 15 - Limitação do torque de frenagem.....	40
Figura 16 - Esquema do inversor de tração .....	41
Figura 17 - Curva geral característica de um sistema de tração .....	42
Figura 18 - Esquema do circuito do inversor de tração série 3000 .....	47
Figura 19 - Ilustração dos equipamentos de tração da série 7000.....	50
Figura 20 - Gráfico do resultado Viagem de Calmon Viana à Brás.....	51
Figura 21 - Detalhe do diagrama do circuito de alimentação principal alta tensão....	53
Figura 22 - Trem da série 8000 .....	55
Figura 23 - Potência Consumida e Regenerada Trecho Lapa / Barra Funda .....	61
Figura 24 - Mapa da linha 8 com divisão por municípios .....	62
Figura 25 - Distâncias (km) entre estações da linha 8 .....	63
Figura 26 - Localização das Subestações da linha 8 .....	64
Figura 27 - Controle modulado de largura de pulso .....	77
Figura 28 - Sistema de modulação de onda senoidal de largura de pulso.....	78
Figura 29 - Sequência de controle ligado/desligado para os IGBT's (rotação para frente).....	80

Figura 30 - Operação da frenagem no modo de 1 pulso.....	81
Figura 31 - Modo de frenagem (1).....	82
Figura 32 - Modo de frenagem (2).....	83
Figura 33 - Modo de frenagem (3).....	83
Figura 34 - Modo de frenagem (4).....	84
Figura 35 - Modo de frenagem (5).....	84
Figura 36 - Modo de frenagem (6).....	85
Figura 37 - Modo de frenagem (7).....	85
Figura 38 - Modo de frenagem (8).....	86
Figura 39 - Modo de frenagem (9).....	86
Figura 40 - Modo de frenagem (10).....	87
Figura 41 - Modo de frenagem (11).....	87
Figura 42 - Modo de frenagem (12).....	88
Figura 43 - Circuito do inversor de tração Série 8000 .....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da energia consumida e regenerada.....	50
Tabela 2 - Resultados das Viagens Monitoradas .....	57
Tabela 3 - Dias e horários das viagens monitoradas .....	57
Tabela 4 - Valores Médios das viagens .....	59
Tabela 5 - Domínio das Subestações da Linha 8.....	65
Tabela 6 - Média por mês e o total dos valores pagos e o consumo em 2015 .....	65
Tabela 7 - Consumo dos discos de freio série 8000 .....	67
Tabela 8 - Consumo das pastilhas de freio série 8000 .....	67
Tabela 9 - Economia de freio com utilização da frenagem eletrodinâmica .....	68
Tabela 10 - Legenda das formas de ondas e tensões de fases.....	77
Tabela 11 - Legenda da modulação de ondas e tensões de saídas .....	78
Tabela 12 - Legenda da operação no modo de 1 pulso .....	81
Tabela 13 - Legenda das siglas nos 12 modos de frenagem.....	82

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Torque de tração.....	39
Equação 2 - Torque de frenagem.....	40
Equação 3 - Índice de consumo específico de energia elétrica .....	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AJO	Estação Antônio João
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATC	Automatic Train Control (Controle Automático do Trem)
BAS	Estação Brás
BCU	Brake Control Unit (Unidade de Controle de Freio)
BFU	Estação Barra Funda
BRU	Estação Barueri
CA	Corrente Alternada
CAF	Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles
CBTU	Companhia Brasileira de Trens Urbanos
CC	Corrente Contínua
CCO	Centro de Controle Operacional
CCU	Central Control Unit (Unidade Central de Controle)
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CPB	Estação Carapicuíba
CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
CSA	Estação Comandante Sampaio
CVN	Estação Calmon Viana
CVS	Conversor Estático Auxiliar
DC	Direct Current – Corrente Direta ou Contínua
DCPT UNIT	Detector de tensão de rede
DMO	Estação Domingos de Moraes
ECD	Estação Engenheiro Cardoso
FEPASA	Ferrovias Paulista S/A
GMC	Estação General Miguel Costa
GOF	Gerencia de Operações e Infraestrutura
GR	Taxa de engrenagem
GTO	Gate Turn-Off (Tiristores comutáveis pela porta)
HMI	Human Machine Interface (Interação Homem-Máquina)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolar de Porta Isolada)
ILE	Estação Imperatriz Leopoldina
IPM	Intelligent Power Module (Módulo Inteligente de Energia)

IPV	Estação Itapevi
JBE	Estação Jardim Belval
JDI	Estação Jandira
JPR	Estação Júlio Prestes
JSI	Estação Jardim Silveira
LAB	Estação Lapa B
MVB	Multifunction Vehicle Bus (Protocolo dados para veículos)
OSA	Estação Osasco
PAL	Estação Presidente Altino
PWM	Pulse-Width Modulation (Modulação por largura de pulso)
QTU	Estação Quitaúna
SCD	Estação Sagrado Coração
SCE	Subsistema de Controle de Energia
SE	Subestação
STE	Estação Santa Teresinha
TCN	Train Communication Network (Rede de comunicação de Trens)
TCU	Traction Control Unit (Unidade de Controle de Tração)
TMF	Tecnologia Metroferroviária
TUE	Trem Unidade Elétrica
USP	Universidade de São Paulo
VI	Velocidade Imposta
VVVF	Variable-Voltage, Variable-Frequency (Variação de Voltagem e Variação de Frequência)
V/F	Tensão / Frequência
WD	Diâmetro da roda



## LISTA DE SÍMBOLOS

GWh	gigawatt-hora
kWh	quilowatt-hora
kV	quilovolt
Vcc	Tensão em corrente contínua
Vca	Tensão em corrente alternada
Kgf/cm <sup>2</sup>	quilograma-força por centímetro quadrado
bar	bar
mm	milímetros
Hz	Hertz
m/s <sup>2</sup>	metro por segundo ao quadrado
km/h	quilômetros por hora
N	Newton
η	Eficiência da engrenagem
s	Frequência de escorregamento
le	Índice de consumo específico de energia elétrica
°C	grau Celsius

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Motivação e Objetivos.....	16
1.2	Metodologia do trabalho.....	17
1.3	Resumo dos capítulos.....	17
2	PRINCÍPIOS DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DE TRAÇÃO .....	19
2.1	Rede Aérea .....	19
2.2	Subestações .....	20
2.3	Demanda de energia da alimentação do sistema de tração elétrica.....	25
3	PRINCÍPIOS DO SISTEMA DE TRAÇÃO E FRENAGEM DO TREM .....	27
3.1	Sistema de tração .....	29
3.2	Sistema de Frenagem.....	30
3.3	O Processo de frenagem .....	33
3.4	Circuito auxiliar do conversor estático.....	34
3.5	O Motor de Tração .....	36
3.6	O Inversor de Tração .....	38
3.6.1	Padrão de Torque de tração.....	39
3.6.2	Padrão de Torque de Frenagem.....	39
3.6.3	Princípios operacionais.....	40
3.6.4	Métodos de controle do inversor VVVF .....	42
4	ANÁLISE DA FRENAGEM REGENERATIVA DOS TRENS.....	44
4.1	Descrição dos trens com frenagem regenerativa.....	45
4.2	A Frenagem regenerativa dos trens da CPTM.....	46
4.3	Eficácia do freio regenerativo dos trens da CPTM .....	52
4.4	Monitoramento da frenagem regenerativa em trens operacionais linha 8....	56
4.5	Característica da linha 8 - Diamante .....	62
4.6	Características do sistema de alimentação elétrica da linha 8.....	64
4.7	Redução de gastos no sistema de freio eletropneumático.....	66
5	CONCLUSÃO .....	69
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
	GLOSSÁRIO .....	73
	APÊNDICE .....	74

ANEXO A - CONTROLE DA MODULAÇÃO .....	77
ANEXO B – MODOS DE PULSO .....	79
ANEXO C – CONTROLE DE DIREÇÃO DO MOTOR DE TRAÇÃO (MODO 1 PULSO) .....	80
ANEXO D – OPERAÇÃO DO FREIO ELÉTRICO (MODO 1 PULSO) .....	81
ANEXO E – CIRCUITO DO INVERSOR DE TRAÇÃO SÉRIE 8000.....	89

## 1 INTRODUÇÃO

O Sistema metroferroviário para transporte de passageiros no Brasil é essencialmente alimentado por energia elétrica. Atualmente existem 20 sistemas de transporte urbano de passageiros sobre trilhos distribuídos em 11 estados e no Distrito Federal, sendo 11 sistemas eletrificados e os demais com tração por locomotiva ou eletrodiesel.

Em 2014 os sistemas metroferroviários eletrificados consumiram 1800 GWh de energia elétrica, representando 0,4 % do consumo energético total do país. Foram responsáveis por transportar 9,8 milhões de passageiros por dia e 2,8 bilhões de passageiros por ano.

O sistema metroferroviário Paulista é composto por três operadoras, a Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) que atende 22 municípios com 91 estações e mais de 250 km de malha ferroviária operacional, transportando em média 2,8 milhões de passageiros por dia. O Metrô e a ViaQuatro atuantes na cidade de São Paulo somam 67 estações e mais de 78 km de malha ferroviária sendo responsáveis por transportar diariamente mais de 4,2 milhões de passageiros.

Com a crise energética que o país vem enfrentando devido aos baixos volumes dos reservatórios, limitações de disponibilidade e distribuição de energia e a necessidade de produzir energia através de termoeletricas, o custo da energia elétrica aumentou consideravelmente para todos os tipos de consumidores, de edificações até grandes indústrias, não sendo diferente para os sistemas metroferroviários.

O uso racional de energia elétrica e ações que reflitam na economia e melhor aproveitamento do recurso são fatores importantes para reduzir gastos com energia elétrica, pois a cada kW gerado o alto valor de investimento em atendimento a crescente demanda de energia, incide em novas usinas geradoras, no aumento de linhas de transmissão e distribuição, em sistemas de filtragem e retificação chegando ao fornecimento para as unidades consumidoras (Artibani, Prendes, Almeida, 2007).

O custo pode ser minimizado e/ou postergado através de mudanças de hábitos como consumo consciente, investimentos em equipamentos com maior eficiência energética, utilização de novas tecnologias, com o reaproveitamento de energia elétrica ou no armazenamento em acumuladores de energia elétrica.

Os três principais custos operacionais dos sistemas metroferroviários são com pessoal, manutenção e energia elétrica. O consumo de energia representa 10 % do custo operacional tornando-se um dos principais insumos para os sistemas metroferroviários, sendo que a energização do sistema de tração elétrica, isto é, a energia consumida para alimentar os trens que circulam pela malha ferroviária corresponde a 60 % do total gasto com energia para alimentar os demais subsistemas como sinalização, controle, comunicação, além de estações, oficinas e abrigos de manutenção.

A CPTM trabalha com os sistemas de mercado livre e mercado cativo na aquisição de energia para o suprimento da tração elétrica. No último ano arcou com o aumento de 95 % na conta de energia, passando por diversos ajustes tarifários como 25 % de reajuste anual das distribuidoras, 21 % de reajuste extraordinário em 2015, 24 % de reajuste no sistema de bandeiras e também 25 % de reajuste de desintegralização da conta (ANP trilhos 2015).

A conta paga em 2015 somente com gastos de energia elétrica de tração foi de R\$ 226 milhões, consumindo no total de 506.118.992,24 kWh no ano.

Por essa razão toda e qualquer ação que contribua para um menor consumo de energia, mantendo a qualidade e confiabilidade na prestação do serviço, é aceita e incentivada, sendo uma destas contribuições, a frenagem regenerativa dos trens, a premissa para a realização deste trabalho.

A frota de trens da CPTM é composta atualmente por 185 trens operacionais, divididos em 15 séries, sendo que 114 trens trabalham com motores elétricos em corrente alternada e possuem sistema de regeneração de energia e os trens restantes, de séries antigas, trabalham com motores em corrente contínua.

A demanda diária de passageiros nas 6 linhas existentes da CPTM é atendida com 155 trens circulando pelas linhas da malha ferroviária nos horários de pico, consumindo energia elétrica em prol da mobilidade urbana Paulista, perfazendo mais de 2700 viagens por dia.

Os novos trens adquiridos apresentam maior confiabilidade, qualidade, conforto, segurança e possuem equipamentos com melhor eficiência energética. O acionamento de abertura e fechamento de portas anteriormente feito com pistões pneumáticos, agora são acionados por motores elétricos, mesma situação para os limpadores de para-brisas e o controle do sistema de freio.

A instalação do sistema de ar condicionado para o conforto térmico dos passageiros impactou no aumento da carga elétrica consumida pelos novos trens. O circuito do ar condicionado em cada carro é composto por quatro moto-compressores, exaustores de condensação e ventiladores de evaporação.

O sistema de controle de tração possibilita a regeneração de energia, ou seja, nas desacelerações necessárias realizadas durante o trajeto, a energia regenerada proveniente da frenagem elétrica é reaproveitada na alimentação dos circuitos auxiliares e baterias do próprio trem, podendo também contribuir na alimentação de tração de outros trens que compartilham o mesmo trecho de rede aérea.

Existem outros benefícios intrínsecos ao sistema de frenagem regenerativa dos trens como redução do consumo de pastilhas e discos de freio, redução do custo e tempo da manutenção, contribuindo com o aumento da disponibilidade operacional, aumento da vida útil do sistema de freio de atrito e redução do calor dissipado nos discos de freio e do particulado proveniente do gasto das pastilhas, preservando os subsistemas e equipamentos instalados na parte inferior do piso dos trens.

## **1.1 Motivação e Objetivos**

A motivação para a realização desta análise é aplicar os conhecimentos adquiridos nas aulas do curso de Tecnologia MetroFerroviária considerando a troca de

informações entre alunos e professores sobre os diversos temas abordados e a oportunidade de estudar sobre o assunto que impacta diretamente nos custos operacionais do sistema metroferroviário, podendo ser ampliado e aplicado em diversos sistemas com motorização elétrica de grandes cargas.

A aquisição de novos trens com sistemas modernos de controle de tração e com motores em corrente alternada tornaram possível a aplicação efetiva deste tipo de tecnologia, reduzindo energia e minimizando o custo da manutenção do sistema de frenagem mecânica.

O objetivo da análise é comprovar a eficácia do sistema regenerativo na redução do consumo de energia elétrica dos trens em circulação nas linhas da CPTM. Para isso serão apresentados os trens que possuem estes sistemas, sua forma de controle, o impacto e influência da aplicação do sistema regenerativo na circulação de trens nas linhas da empresa.

## **1.2 Metodologia do trabalho**

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho foi baseada na experiência e conhecimento profissional, na revisão de bibliografias dos assuntos abordados e os ensaios com monitoramento para comprovação da eficácia do sistema utilizado.

## **1.3 Resumo dos capítulos**

O Capítulo 1 é a introdução do trabalho, onde apresenta a motivação, objetivos, metodologia e o resumo do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta os princípios do sistema de alimentação elétrica de tração de modo geral sobre rede aérea e subestações, bem como os subsistemas que configuram o circuito de tração, além dos componentes utilizados nestes subsistemas e os tipos de demanda de energia que a empresa contrata junto às concessionárias.

O Capítulo 3 apresenta de modo geral os princípios do sistema de tração e frenagem do trem e o processo de atuação da frenagem. Aborda o circuito auxiliar do conversor, elemento importante para a configuração e funcionamento dos sistemas do trem. Apresenta também as características do motor de tração e do inversor de tração, além dos padrões de torque, os princípios operacionais e os métodos de controle da velocidade do trem.

O Capítulo 4 é a análise da frenagem regenerativa dos trens, apresentando os tipos de trens com esta característica. Trata sobre a frenagem regenerativa dos trens da CPTM através de estudos já realizados, ensaios e monitoramentos, onde foi possível medir o consumo de energia em tração, o consumo de energia total e a energia regenerada de um trem em uma determinada linha. Finaliza com as características da linha e do circuito de alimentação elétrica da linha escolhida para os monitoramentos.

O Capítulo 4 aborda também um estudo sobre a redução dos gastos no sistema de freio eletropneumático nos trens que utilizam a frenagem eletrodinâmica.

O Capítulo 5 é a conclusão sobre a economia gerada com a utilização da frenagem regenerativa e sugestão para trabalhos futuros.

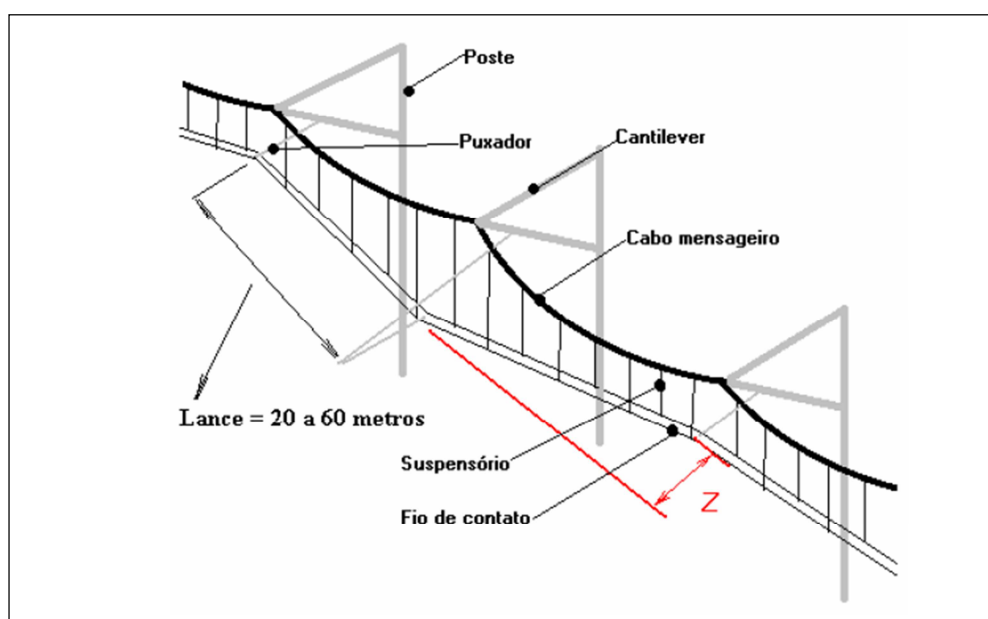


## 2 PRINCÍPIOS DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA DE TRAÇÃO

A tração elétrica aplicada em sistemas metroferroviários iniciou-se com a implantação das primeiras linhas eletrificadas para bondes elétricos no transporte de passageiros do Brasil no começo do século XX. Os atuais sistemas metroferroviários também utilizam linhas eletrificadas para alimentar os trens elétricos. Estas linhas compõem os sistemas denominados Terceiro Trilho ou Rede Aérea.

### 2.1 Rede Aérea

Na CPTM a energia elétrica de tração utilizada para alimentação dos trens durante sua movimentação é fornecida pela rede aérea que recebe através do cabo mensageiro a energia das subestações ou cabines seccionadoras, conforme visto na Figura 1, transferindo esta energia para um ou dois cabos chamados de fio de contato.



**Figura 1 - Disposição da rede aérea de tração**

Fonte: (Teranishi, 2004)

A rede aérea é constituída de estrutura de sustentação, sistemas de suspensão e compensação chamados de suspensórios e ligações equipotenciais instaladas a cada 120 m para garantir a transferência de energia entre o fio de contato e o cabo mensageiro.

A letra Z da Figura 1 representa o deslocamento do fio de contato em relação ao centro da via permanente, ao longo do trecho, para minimizar a concentração de esforços de contato e a distribuição da área de contato com a canoa do pantógrafo do trem. No circuito em corrente contínua o fio de contato é o polo positivo e o trilho é o polo negativo ou linha de retorno do sistema de tração. Esta estrutura acompanha os trilhos por toda extensão da via e sua altura varia de acordo com as características do trecho ou estação.

A rede aérea é seccionada por chaves seccionadoras junto às subestações adjacentes e são instaladas entre os alimentadores desta mesma subestação. Ao longo da rede aérea estão instaladas outras chaves seccionadoras, com a finalidade de isolar seções da rede, tanto para intervenção da manutenção como para manobras da operação.

## **2.2 Subestações**

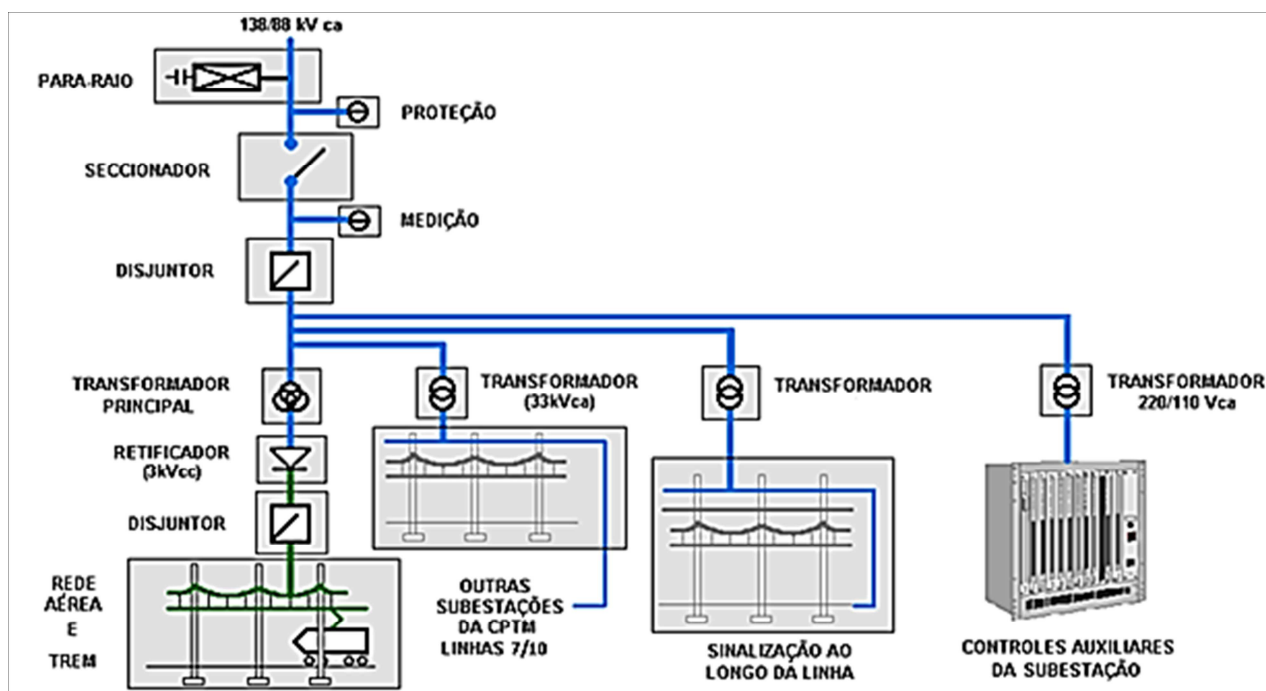
A energia elétrica de tração utilizada pela ferrovia é disponibilizada na tensão de 3000 volts em corrente contínua CC, porém este nível de tensão é diferente dos padrões de transmissão e distribuição de energia fornecida pelas concessionárias. Sendo assim, a CPTM possui instaladas ao longo das linhas, subestações abaixadoras retificadoras, que recebem 88 ou 138 kV em corrente alternada CA, rebaixam e retificam a tensão para 3 kV em corrente contínua energizando o circuito de tração, através da rede aérea de tração para alimentação dos trens. As subestações suprem ainda o sistema de sinalização da operação de trens e demais circuitos auxiliares.

Para o circuito em corrente contínua, o pólo positivo é fornecido pelos disjuntores de 3 kVcc e o pólo negativo é fornecido através dos trilhos que estão conectados ao anodo dos retificadores das subestações.

Chaves seccionadoras são equipamentos corta circuitos e por não possuírem dispositivo de extinção de arco voltaico não são manobrados com carga. São destinadas a isolar circuitos para manutenção ou manobra de operação.

Os disjuntores de proteção de 3 kVcc ou 88 kVca são destinados a proteger o circuito de alimentação contra possíveis sobrecargas no sistema, interrompendo a alimentação de forma sincronizada e instantânea.

A Figura 2 representa um modelo simplificado com os principais componentes constituintes de uma subestação retificadora e a distribuição de alimentação dos sistemas.



**Figura 2 - Ilustração de uma subestação retificadora para fornecimento de energia aos trens**

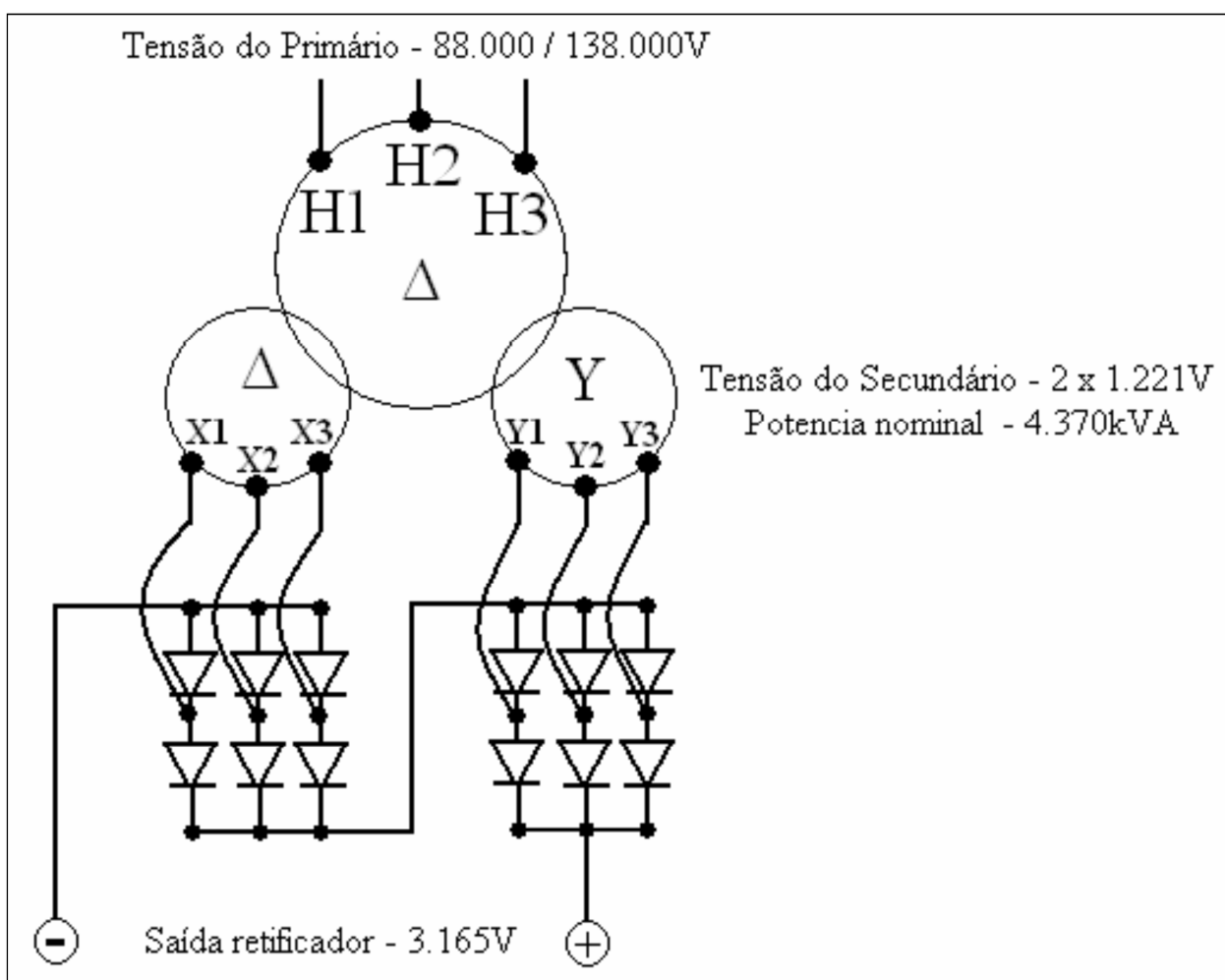
Fonte: (Arruda; Bernardes; Souto, 2012)

Os disjuntores de proteção podem ser manobrados em carga, no caso do disjuntor 3 kVcc por utilizar uma barreira com sopro magnético e o disjuntor 88 kVca por utilizar uma câmara de extinção de arco voltaico como elemento de extinção, evitando que seus contatos internos se danifiquem. A corrente de disparo dos disjuntores de 3 kVcc é aferida periodicamente, onde dependendo do local e linha, pode ser ajustada entre 2000 e 3500 A. Nas subestações existem quatro tipos de transformadores distintos, a saber:

Transformadores principais são destinados a rebaixar a tensão alternada de 88 kV em tensão alternada de 1,22 kV para alimentar as entradas do retificador, dos transformadores auxiliares e de sinalização (6,6 kV).

Transformadores de corrente e de potencial são destinados a reduzir a corrente e a tensão da entrada de linha a níveis compatíveis com a alimentação dos painéis de medição e relés de proteção.

Transformadores de 6,6 kV são destinados a alimentar o sistema de sinalização e alimentação primária dos motores das chaves seccionadoras de rede aérea telecomandada pelo CCO sendo conectados no secundário dos transformadores principais. A Figura 3 ilustra um diagrama simplificado de um retificador de potência da linha 8.



**Figura 3 - Diagrama simplificado de um retificador de potência da linha 8**

Fonte: (GOF/CPTM, 2010)

Transformadores auxiliares são destinados a alimentar os sistemas auxiliares das subestações, tais como, carregador de baterias, iluminação e tomadas, sendo também conectados no secundário dos transformadores principais.

Os retificadores são destinados a transformar tensão e corrente alternada entre fases de 1,22 kVca em tensão de aproximadamente 3,1 kV (em vazio) e corrente contínua nominal de 1250 A. Após o processo de retificação a energia passa por um conjunto harmônico de filtragem.

Os fusíveis são elementos de proteção também presentes nos circuitos elétricos das subestações tais como os utilizados para proteção dos diodos no retificador.

Filtros ressonantes são destinados a suavizar o chaveamento da condução de corrente dos diodos, fornecendo tensão contínua com níveis de harmônicos, gerados pelo sistema de retificação, abaixo dos limites especificados pela concessionária de energia elétrica.

Os painéis de comando são destinados ao controle da operação de uma subestação, da sinalização de alarmes e dos relés de proteção local, além de mostradores analógicos de tensão e corrente, fazem a lógica de supervisão, desarme e bloqueio dos circuitos em caso de anormalidade ou avaria.

Os retificadores de potência denominados na empresa como “Onduladores” são equipamentos que transformam a corrente contínua resultante da energia regenerada pela frenagem dos trens em corrente alternada.

Caso a energia regenerada em corrente contínua, devolvida ao sistema de alimentação, não seja aproveitada pelos trens adjacentes naquele instante, essa energia sobressalente será transformada pelos “Onduladores”, em corrente alternada, sendo devolvida para as concessionárias.

As subestações da linha 8 que possuem Onduladores em sua configuração original estão com este equipamento desativado.

Na empresa não foram encontrados registros sobre os motivos reais desta desativação.

Apenas no documento Visão sistêmica de Subestações e Cabines seccionadoras, de 2010, elaborado pela Gerência de Operação e Fornecimento de energia, aborda o tema da seguinte maneira:

Este equipamento (Ondulador) encontra-se desativado em todas as Subestações da Linha 8, pelo motivo de não serem economicamente viáveis e não apresentarem assistência técnica satisfatória pelo fabricante.

Especialistas da empresa, atuantes no departamento de distribuição de energia afirmam que a proposta de devolver energia para as concessionárias nunca se mostrou viável do ponto de vista econômico, pela baixa qualidade da energia devolvida, dentre outros aspectos. Em conversas com empregados que trabalham há anos no setor de distribuição de energia, informam que na década de 80 com o início da operação dos trens equipados com motores em corrente contínua e sistema de frenagem regenerativa (série 5000), surgiram diversos problemas no sistema de alimentação de tração.

Na ocasião os intervalos entre trens eram maiores que 10 minutos, diminuindo a possibilidade de aproveitamento da energia regenerada, consequentemente devolvendo a maior parte desta energia para as subestações, o que ocasionou diversos desarmes dos disjuntores de 3 kVcc das subestações devido ao aumento da tensão de linha.

Outro fator apontado foi a complexidade do equipamento e falta de documentação técnica traduzida, uma vez que estes equipamentos foram fabricados por empresas estrangeiras, dificultando a realização da manutenção com qualidade para manter o equipamento em funcionamento. A reposição de peças avariadas dependia de importação o que acarretava num maior tempo de manutenção, ou seja, maior período do equipamento isolado.

Entre a maioria das subestações, estão instaladas cabines de Seccionamento e Paralelismo que protegem e equilibram a queda de tensão causada pela circulação de trens (cargas consumidoras), diminuindo o tamanho do trecho entre as subestações ao longo das linhas.

### **2.3 Demanda de energia da alimentação do sistema de tração elétrica**

A CPTM atualmente opera suas linhas de alimentação elétrica com 181 MW de potência instalada e distribuída entre 21 subestações e 22 cabines seccionadoras para energização das 6 linhas da empresa.

A aquisição de energia contratada pela CPTM é através do sistema de Mercado Livre e Mercado Cativo de Energia para o suprimento da energia consumida na tração elétrica.

A CPTM possui 19 contratos de alta tensão, 2 contratos da CESP e 46 contratos de média tensão para alimentar todo o complexo ferroviário de tração, energização das oficinas, abrigos, prédios administrativos e estações.

Em março de 2005 a CPTM passou a contratar também energia pelo sistema de Mercado Livre, comprando energia (kWh) diretamente do fornecedor que ofereça o preço mais vantajoso.

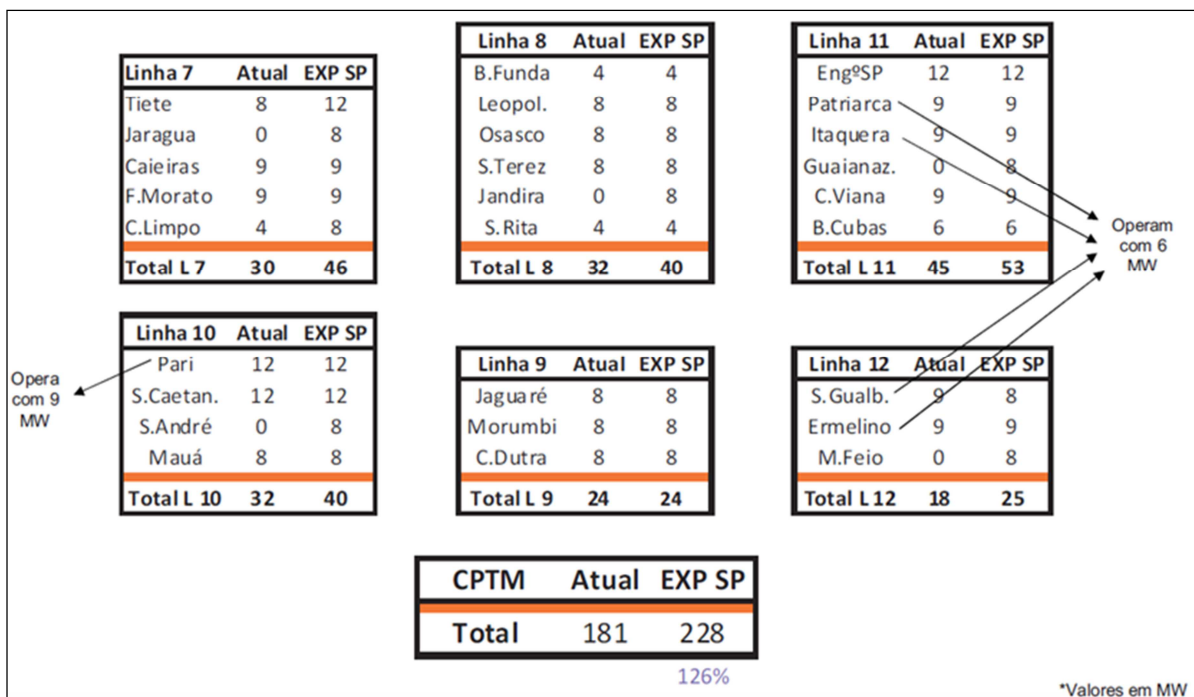
Como pré-requisito para a migração ao Mercado Livre, foi regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que a unidade consumidora interessada seja atendida em Alta Tensão e contrate demanda mínima em 3 MW.

Há duas formas de pagamento da energia consumida, o pagamento de demanda (kW) que são tarifas de uso do sistema de distribuição diretamente à concessionária detentora da região onde a subestação encontra-se instalada e do pagamento da energia (kWh) à CESP.

Das 21 subestações em operação, 16 estão inseridas no Mercado Livre e 5 subestações inseridas no mercado cativo, modalidade de contratação convencional, onde tanto a demanda quanto a energia são pagas à concessionária local.

A CPTM trabalha com as concessionárias AES Eletropaulo, EDP Bandeirante e Elektro. No Glossário do presente trabalho é possível conhecer os tipos de consumidores e tipos de demandas de energia.

Existe um plano de expansão e melhoria na parte de alimentação elétrica da empresa. Este plano está em andamento sendo previsto um aumento significativo de 126% da potência atual utilizada na operação comercial de trens, conforme visualizado na Figura 4.



**Figura 4 - Representação da Potência Instalada atual x plano de expansão**

Fonte: (WebCPTM, 2015)

As 5 subestações inseridas no Mercado Cativo são a SE Francisco Morato da linha 7, as SE's Cidade Dutra e Jaguaré da linha 9 e as SE's Manoel Feio e Sebastião Gualberto da linha 12. As demais subestações estão inseridas no Mercado Livre de energia.



### 3 PRINCÍPIOS DO SISTEMA DE TRAÇÃO E FRENAGEM DO TREM

O equipamento que realiza o contato físico entre o trem e a rede aérea é conhecido como Conjunto Pantógrafo. Instalado sobre o teto dos trens e isolado da cobertura metálica do carro (denominação dada para o vagão de passageiros), o pantógrafo é responsável pela captação da energia que alimenta os circuitos de potência e circuitos auxiliares do trem, e consequentemente os motores de tração.

O pantógrafo é um equipamento eletropneumático articulado, acionado com ar comprimido ou motor elétrico, constituído de elementos mecânicos, molas, réguas de contato, dispositivos de regulagem, etc. Na Figura 5 é possível visualizar o equipamento instalado no carro reboque da série 8000 e sua respectiva Canoa.



Figura 5 - Foto do pantógrafo AM57BU

O equipamento quando acionado exerce uma pressão de contato com a rede aérea de  $10 \text{ kgf/cm}^2$ , garantindo a transferência de energia e minimizando a incidência de faiscamento mesmo com a variação de altura que existe entre o trem e a rede aérea.

Esta variação de altura compreende de 0,25 m a 2,48 m, pois existem alturas distintas para cada modelo de trem, diferentes modelos de estrutura da rede aérea e variação de altura da via permanente em relação à rede aérea.

As réguas de contato podem ser de cobre ou lâminas de eletrografite, fixas em estrutura metálica que compõem o equipamento denominado Canoa.

As Canoas com réguas de cobre recebem a aplicação da massa pantográfica, com um único objetivo, minimizar o atrito do contato entre a rede aérea e o trem durante a circulação em via.

A massa pantográfica é um composto de grafite em pó, vernizes e solventes, aplicada na forma pastosa sobre e entre as réguas de cobre. Após uma semana de cura (secagem da massa) cria-se um depósito de massa sólida que será consumido durante a operação dos trens em circulação num período médio de 6 meses.

Outro fator que contribui para a durabilidade da canoa é a disposição física da rede aérea, em forma de zig-zague, aumentando a região de contato com a Canoa.

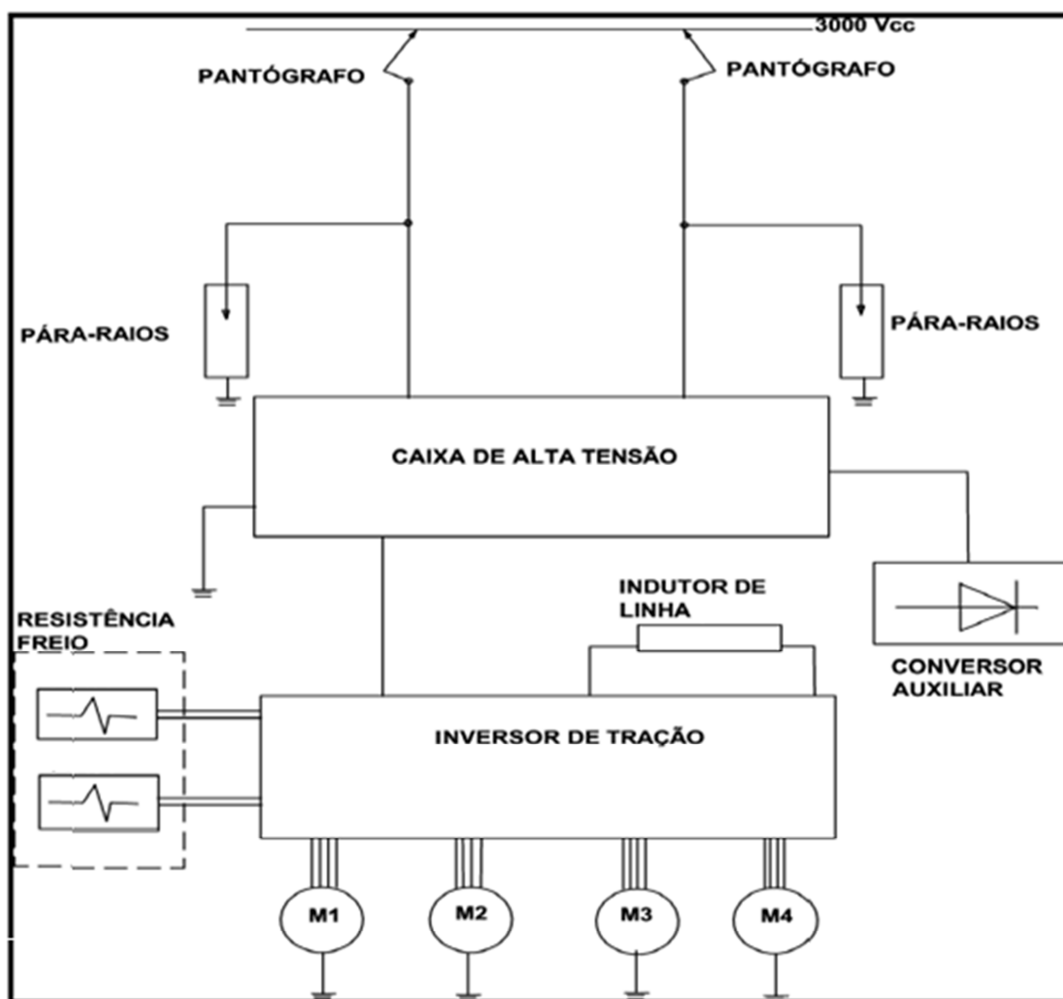
Chamado de Desloque ou Passeio da rede aérea, esta região, ao longo da via, varia de menos (-) 0,5 m a mais (+) 0,5 m, ou seja, o ponto de contato da rede pode variar ao longo da linha em até 1 m.

As réguas de contato da canoa são montadas com 1,3 m de comprimento, assim o desgaste sofrido está distribuído na região do desloque, caso contrário, se não houvesse este desloque o atrito entre as partes ficaria concentrado, a vida útil da canoa diminuiria para até 4 dias e o impacto na manutenção e operação seria desastroso.

Com o avanço tecnológico foram desenvolvidas lâminas de eletrografite e gradativamente substituirão as canoas com lâminas de cobre e massa pantográfica, aumentando a vida útil do equipamento, diminuindo o custo e tempo de reparo de manutenção.

### 3.1 Sistema de tração

Ao iniciar a movimentação dos trens, ou seja, quando for solicitado ao trem, através do manipulador de tração/frenagem, o circuito do inversor é energizado, transformando energia CC em energia CA alimentando os motores elétricos de tração. A Figura 6 representa os principais equipamentos do circuito de alta tensão.



**Figura 6 - Ilustração dos equipamentos de alta tensão**

Fonte: (manual Série 7500)

Estes motores são responsáveis pela aplicação da força necessária para superar um somatório de resistências opostas ao movimento longitudinal do trem, sendo a resistência ao rolamento, devido ao atrito gerado pela força peso, o principal fator oposto a força motriz. Os motores de tração são responsáveis por desenvolver velocidade, acelerações e desacelerações durante o deslocamento do trem entre estações ou pátios.

A energia captada pelo pantógrafo alimenta os circuitos do conversor auxiliar e do inversor de tração, responsável pela transformação da energia CC em energia CA nas tensões e nas frequências de saídas desejadas. O controle da tensão de saída é obtido com a utilização do controle de modulação de largura de pulso (PWM) e Módulos Inteligentes de Energia (IPM) onde a frequência de saída é controlada pela sequência de comutação dos transistores IGBT's.

Este sistema de controle de tensão variável e frequência variável é denominado de Inversor VVVF (Variable-Voltage, Variable-Frequency) que tem como principal função o controle da alimentação de cada motor de tração e o esforço de frenagem elétrica. A desaceleração e parada dos trens são garantidas pelo sistema de frenagem eletrodinâmica utilizando os motores de tração na frenagem elétrica e/ou o freio de atrito na frenagem mecânica.

### 3.2 Sistema de Frenagem

O sistema de frenagem é constituído de cinco subsistemas distintos e atuam de acordo com necessidade operacional imposta a um ou mais destes subsistemas. A Figura 7 representa o sistema de freio e seus subsistemas utilizados para os diversos tipos de frenagem.



**Figura 7 - Ilustração do sistema de frenagem do trem**

Fonte: (Manual Série 7500)

Os principais subsistemas são: Freio eletrodinâmico, Freio de serviço eletropneumático e Freio de emergência. Os outros dois subsistemas são: Freio de estacionamento e Freio de reboque que são utilizados em condições operacionais específicas.

### **Freio eletrodinâmico**

A frenagem eletrodinâmica é realizada pelo sistema de tração, utilizando a energia cinética do trem, no momento das desacelerações, onde o inversor configura os motores de tração para o modo gerador e através da força contra eletromotriz realiza a frenagem elétrica. Esta frenagem elétrica é possível somente nos carros motores, onde estão instalados os motores de tração. A Figura 8 ilustra os componentes responsáveis por este tipo de frenagem.



**Figura 8 - Ilustração do sistema de frenagem elétrica**  
Fonte: (SIEMENS, 2013)

### **Freio de serviço eletropneumático**

A frenagem de serviço eletropneumática, conhecida por frenagem mecânica ou frenagem de atrito, é realizada por fricção, através da força exercida pelas pastilhas de freio sobre os discos instalados em todas as rodas do trem, seja carro motor ou carro reboque. A Figura 9 ilustra os componentes do sistema de freio mecânico.



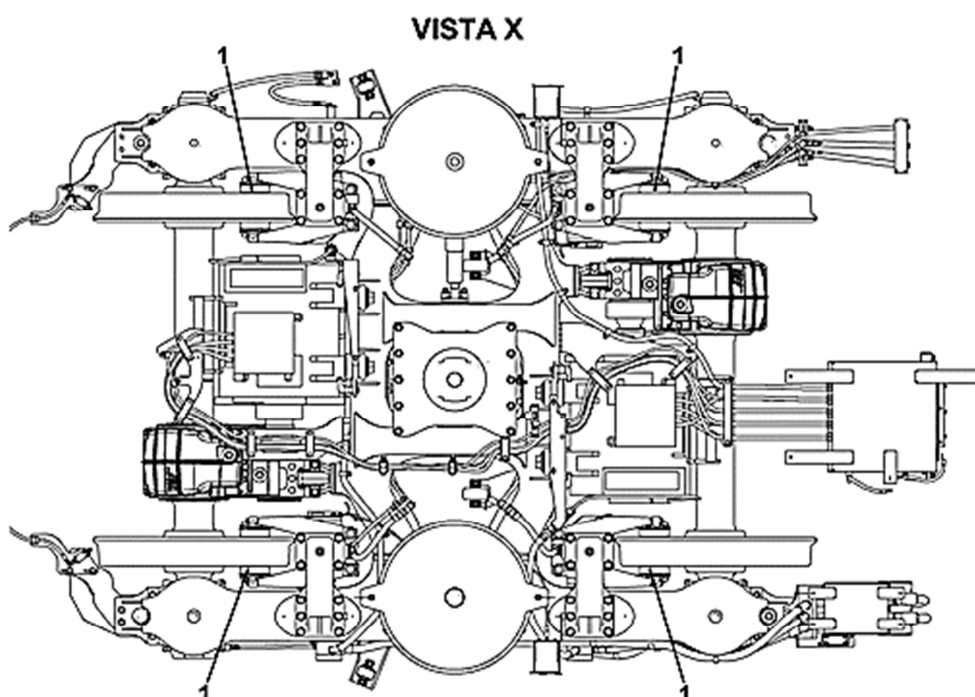
**Figura 9 - Ilustração do sistema de frenagem mecânica com freio de atrito**  
Fonte: (SIEMENS, 2013)

O controle desta frenagem de serviço é através do painel pneumático comandado pela central eletrônica de controle de freio Brake Control Unit (BCU) comumente chamada de unidade central de freio.

### Freio de emergência

A frenagem de emergência é baseada no princípio de desativação, garantindo frenagem caso haja qualquer falha no sistema eletrônico do freio. É realizada através da abertura do circuito do freio de emergência com o desligamento da eletroválvula de emergência instalada num canal independente dos demais sistemas de frenagem.

A frenagem de emergência é utilizada em situações onde há necessidade de parada total do trem no menor espaço e tempo possível, quando o condutor é penalizado pela operação assistida ou quando é acionado algum dispositivo de segurança interrompendo o laço de emergência. A Figura 10 ilustra um truque motor completo da série 8000 e a localização das pastilhas de freio representados pela posição 1.



**Figura 10 - Ilustração de um truque motor e o sistema de freio de atrito**

Fonte: (Manual série 8000)

### Freio de estacionamento

Para garantir que o trem fique estacionado de forma segura e independente da produção de ar do trem, o freio de estacionamento é controlado por um painel pneumático específico e a força de frenagem deste sistema é realizada por molas nas rodas ímpares de cada truque.

## **Freio de reboque**

No caso de necessidade, ao rebocar o trem com uma locomotiva, a frenagem de reboque é utilizada de forma indireta, através de um painel específico, a locomotiva comanda a frenagem do trem rebocado pela pressão do ar no encanamento próprio para a manobra.

### **3.3 O Processo de frenagem**

Em condições normais de operação e demanda solicitada pelo operador do trem, a frenagem é realizada através do freio de serviço, coordenando o freio eletrodinâmico com o freio eletropneumático, ou seja, a central de controle BCU é encarregada de garantir que o trem atinja a taxa de freio necessária, sempre priorizando o freio eletrodinâmico, visando maior economia das pastilhas e discos do freio de atrito.

A BCU faz a interface entre o sistema de comando do trem e o painel pneumático de freio, gerencia o sistema de antiderrapagem e o sistema de descarrilamento através de leituras dos sinais enviados pelos sensores desses sistemas.

A utilização do freio de atrito só é possível devido ao sistema de produção e distribuição de ar que garantirá quantidade e qualidade no fornecimento de ar para o sistema pneumático de freio e demais componentes pneumáticos, inclusive o sistema de suspensão de ar dos carros.

O conjunto moto-compressor é o responsável pela produção de ar, instalado nos 4 carros reboques com faixa de operação nominal de 8,5 a 10 bar, sendo que somente dois conjuntos trabalham simultaneamente e no modo revezamento para manter o fornecimento de ar, sem que haja aumento na temperatura de trabalho dos moto-compressores destes conjuntos ou por falha de um deles, evitando a aplicação do freio por baixa pressão do encanamento principal.

No caso de falha, o compressor que está em repouso entra em ação, suprimindo a demanda de ar necessária para alimentar e manter o funcionamento dos circuitos pneumáticos do trem.

### 3.4 Circuito auxiliar do conversor estático

Os demais circuitos elétricos do trem são chamados de circuitos auxiliares, sendo o Conversor Estático Auxiliar (CVS) o principal equipamento, por ser responsável pela conversão da energia de alta tensão proveniente do pantógrafo em energia de baixa tensão para alimentar os diversos equipamentos elétricos do trem e os bancos de baterias. A Figura 11 representa a distribuição de energia no trem.

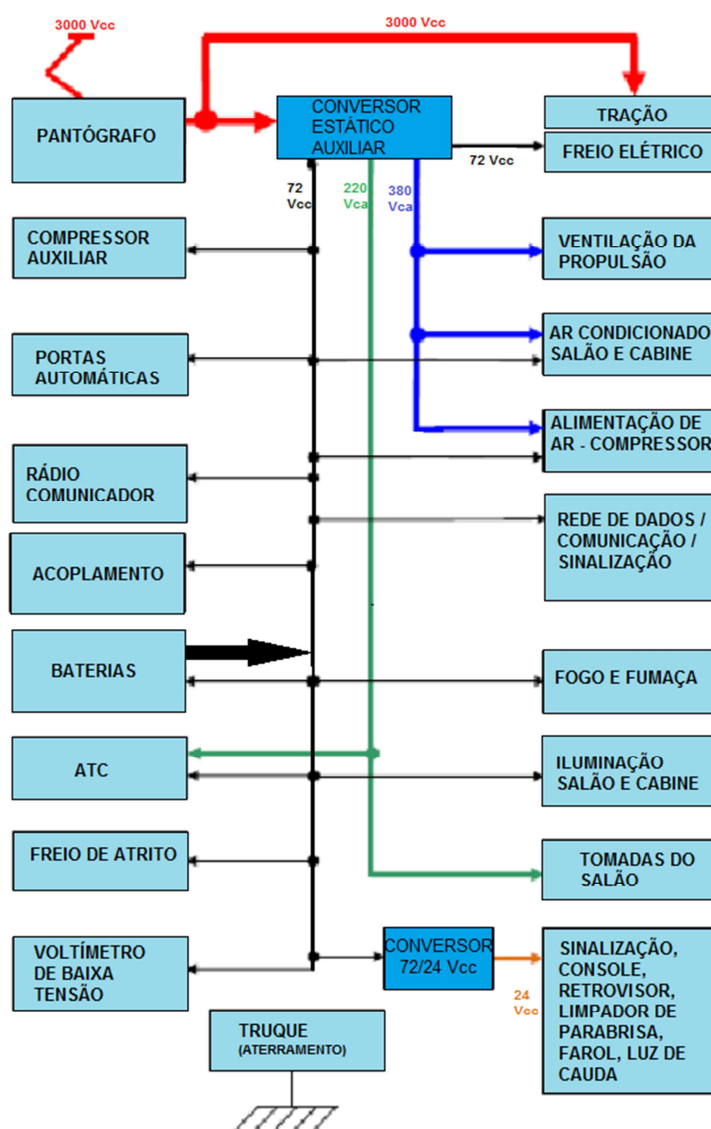


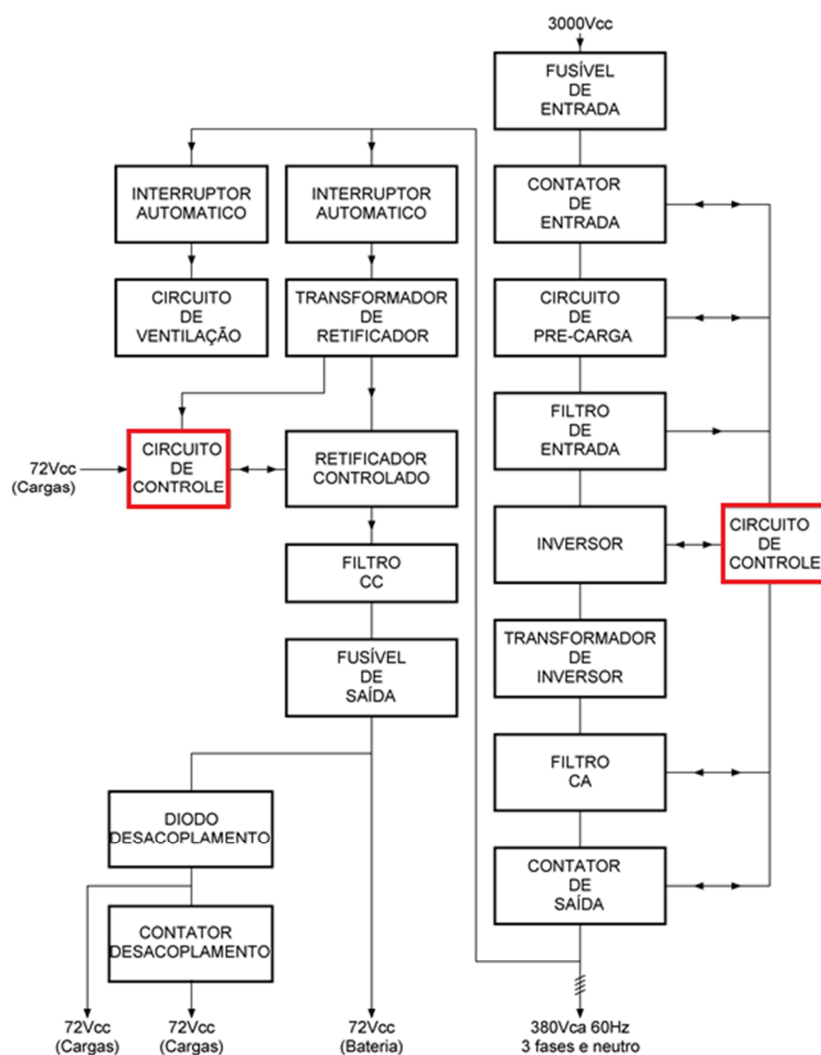
Figura 11 - Distribuição de energia no trem

A principal carga na tensão de 380 Vca é o sistema de ar condicionado. Cada módulo compacto de ar condicionado é composto por 2 compressores com 44,4 kW de potência, 1 motor para o condensador com 3,6 kW e 1 motor para o evaporador com 1,8 kW. Cada carro possui 2 módulos compactos de ar condicionado.



A carga térmica interna dos salões de passageiros dos 8 carros que formam uma composição, varia a cada instante, com a entrada e saída de passageiros durante as aberturas e fechamentos de portas a cada parada em estações.

O Conversor estático auxiliar (CVS) é alimentado com 3000 Vcc, converte esta tensão para baixa tensão em corrente alternada disponibilizando 380 Vca, sendo trifásico e neutro, também alimenta equipamentos de 220 Vca, como por exemplo, o módulo ATC que é utilizado para o controle automático do trem. A Figura 12 representa, através do diagrama de blocos, o circuito do conversor estático auxiliar.



**Figura 12 - Diagrama de blocos representando o circuito do conversor auxiliar**

Fonte: (Manual série 8000)

Da linha de distribuição de 380 Vca sai uma ramificação, onde o CVS retifica a corrente, fornecendo 72 Vcc para alimentar os demais equipamentos, além do carregador e banco de baterias.

O carregador de baterias possui, além da conexão do banco de baterias, outras 2 linhas de fornecimento em 72 Vcc. Uma delas é utilizada para distribuir energia para a maior parte dos serviços e/ou equipamentos do trem, por exemplo, iluminação geral, controle de portas, sinalização, controle e comando de freio, etc.

A outra linha denominada Alimentação Direta de bateria, é destinada para alimentação de equipamentos e serviços essenciais ao trem, devido a necessidade de energização constante, mesmo com o trem desligado, são equipamentos como iluminação de emergência, o sistema de comunicação e vigilância do trem.

### **3.5 O Motor de Tração**

De modo geral, o motor de tração fornece o torque necessário para realizar o translado do trem, ou seja, movimentá-lo pela via férrea. Esse torque motor é o suficiente para vencer as forças de resistência, entrando em regime de aceleração.

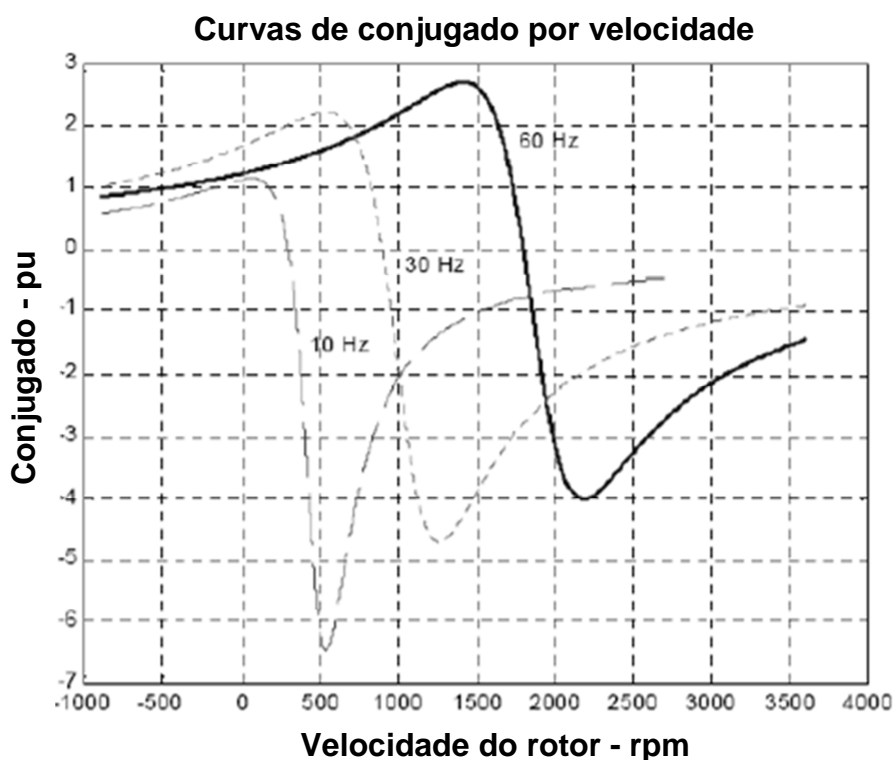
O motor de tração também é capaz de reduzir a velocidade do trem através do ajuste da frequência de escorregamento no estator. Operando como um gerador, devolve energia para a fonte de alimentação, provocando o efeito de frenagem elétrica do trem e minimizando o desgaste da frenagem mecânica de atrito.

As séries 7000, 7500 e 8000 somam 82 trens operacionais, onde cada trem trabalha com 16 motores de tração, totalizando 1312 motores do mesmo modelo. Fabricado pela Mitsubishi Electric, o modelo MB 5136 A é um motor de indução trifásico tipo gaiola de esquilo, com 4 polos, autoventilado, 260 kW de potência nominal no eixo, escorregamento de 1,2 %, comprimento de entreferro de 1,7 mm, grau de isolamento classe 200 e pesa 830 kg. A construção desse motor é mais simples se comparado a um motor de corrente contínua, torna-o mais robusto e confiável, pois o motor não possui elementos de contato móvel como escovas.

O torque do motor é gerado pela interação entre o campo magnético rotativo e a corrente produzida por esse campo no rotor que é a parte móvel do motor, exercendo força mecânica ao rodeiro, através das engrenagens do redutor, para movimentar o trem.

O campo magnético de rotação é produzido pelo estator através da alimentação trifásica CA proveniente do inversor de tração. Isto induz uma corrente na barra do rotor e uma força é gerada na mesma direção da rotação de campo. Alterando a direção deste campo magnético de rotação, a direção da rotação do motor também será modificada.

Segundo (Franceschini, Souto, Silva, 2007) a utilização de motores de indução só foi possível com o controle de tensão e frequência separados. Este equipamento é denominado inversor de tração VVVF com tensão e frequência variável. Este tipo de controlador é necessário, devido à característica "Conjugado x Velocidade" do motor de indução ser limitada, pois o conjugado de partida é pequeno e as correntes de partida são elevadas. A Figura 13 ilustra a variação do Conjugado em três faixas de frequência.

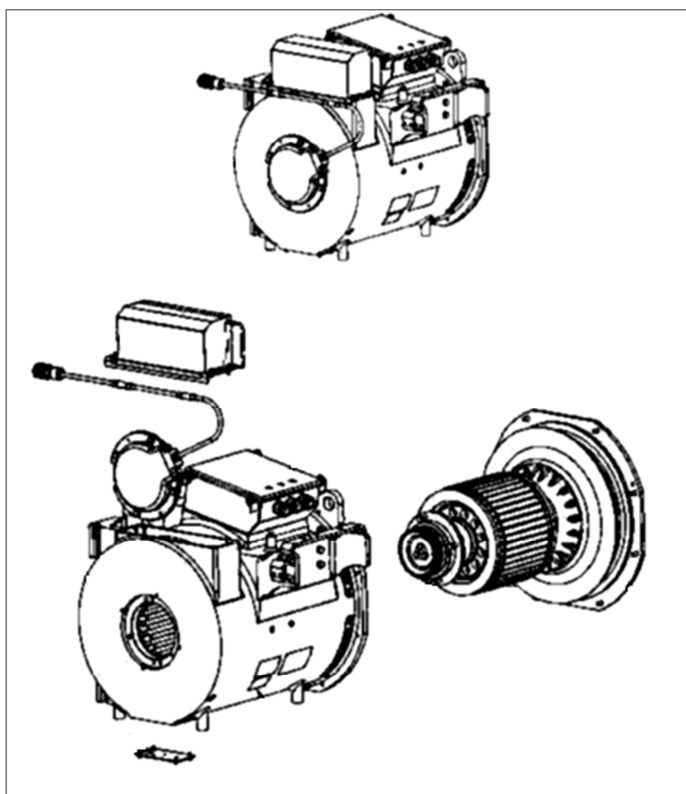


**Figura 13 - Curva característica Conjugado x Velocidade de um motor de indução trifásico**  
 Fonte: (Franceschini, Souto, Silva, 2007)

Outra característica importante dos motores de indução trifásico é o escorregamento, sendo a diferença entre a rotação do campo girante produzido pelas correntes do estator e a rotação mecânica do rotor. Esta diferença determina o conjugado para a operação do motor em tração elétrica.

A operação do motor em tração ocorrerá quando a velocidade do rotor for menor que o campo magnético girante, fazendo com que o escorregamento seja positivo. A operação do motor em frenagem ocorrerá quando a velocidade do campo magnético girante passa a ser menor que a velocidade do rotor, tornando o escorregamento negativo.

A Figura 14 é a ilustração do motor de tração MB 5136 A.



**Figura 14 - Ilustração do motor de tração**

Fonte: (Manual série 8000)

A velocidade da rotação é controlada pelo inversor de tração, sendo uma função da frequência da fonte de alimentação CA.

### **3.6 O Inversor de Tração**

O inversor de tração é o equipamento responsável pelo controle da alimentação e o esforço de frenagem elétrica dos motores de tração, determinando diferentes níveis de torque de tração e frenagem obtendo assim, as variações de aceleração, velocidade e desaceleração desejadas na condução do trem.

O inversor de tração da série 8000 possui as seguintes características:

Modelo:	MAP 264 30VD210
Fabricante:	Mitsubishi Electric
Método de controle:	PWM de fonte de tensão
Sistema de alimentação:	3000 Vcc
Voltagem de saída:	0 – 2250 Vca
Frequência de saída:	0 – 137 Hz
Capacidade de controle:	260 kW x 4 motores

### 3.6.1 Padrão de Torque de tração

A unidade de controle de tração (TCU) calcula o torque do motor de tração de acordo com a demanda imposta pelo operador, nas informações sobre o peso e na velocidade do trem. A taxa de aceleração máxima é de  $0,9 \text{ m/s}^2$  quando todos os eixos motorizados estão em serviço. O esforço de tração máximo é de 34590 N, entre 0 km/h e 37 km/h, na condição de carga máxima sendo convertido para o torque de motor de tração, através da Equação 1.

$$\text{Esforço Tração (N)} \times \frac{\text{WD (m)}}{2} \times \frac{1}{\text{GR} \times \eta} = \text{Torque Motor Tração (Nm)}$$

**Equação 1 - Torque de tração**

Sendo:

WD: Diâmetro da roda = 0,875 m

GR: Taxa de engrenagem = 6,8

$\eta$ : Eficiência da engrenagem = 0,975

Logo, o torque de motor de tração máximo é de 2282,5 Nm.

### 3.6.2 Padrão de Torque de Frenagem

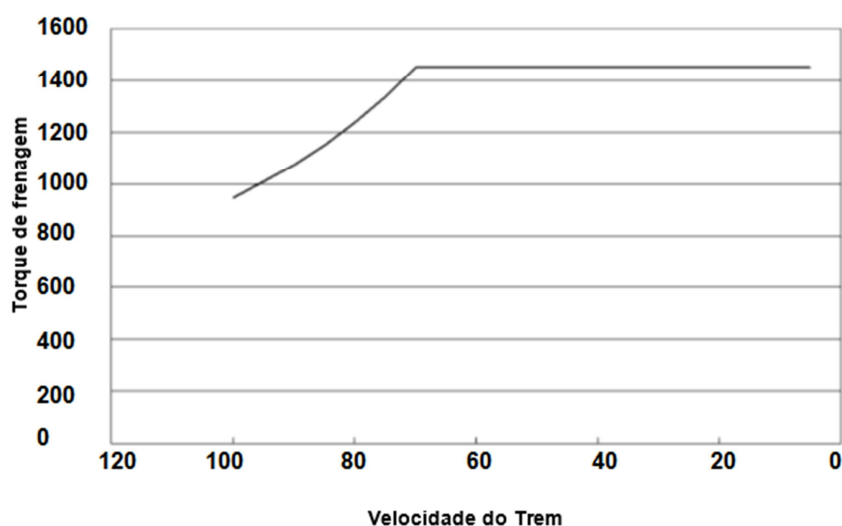
O TCU calcula o torque de frenagem elétrica de acordo com a velocidade do trem, com a demanda imposta pelo operador, nas informações sobre o peso e o torque de frenagem dinâmica máximo permitido.

O esforço máximo de frenagem é 23140 N, entre 70 km/h e 0 km/h, onde o TCU converte o comando de torque de freio eletrodinâmico enviado do BCU para um torque de motor, considerando os valores de diâmetro da roda  $WD = 0,875$  m, taxa de engrenagem  $GR = 6,8$  e eficiência da engrenagem  $\eta = 0,975$ , onde o torque de motor na frenagem é obtido através da Equação 2.

$$ForçaFreioDinâmico (N) \times \frac{WD (m)}{2} \times \frac{1}{GR} \times \eta = TorqueMotorTração (Nm)$$

**Equação 2 - Torque de frenagem**

Logo, o torque de motor de tração máximo na frenagem é de 1451,6 Nm. A Figura 15 ilustra a limitação do torque de motor de tração na frenagem de acordo com a velocidade do trem na desaceleração em frenagem.



**Figura 15 - Limitação do torque de frenagem**

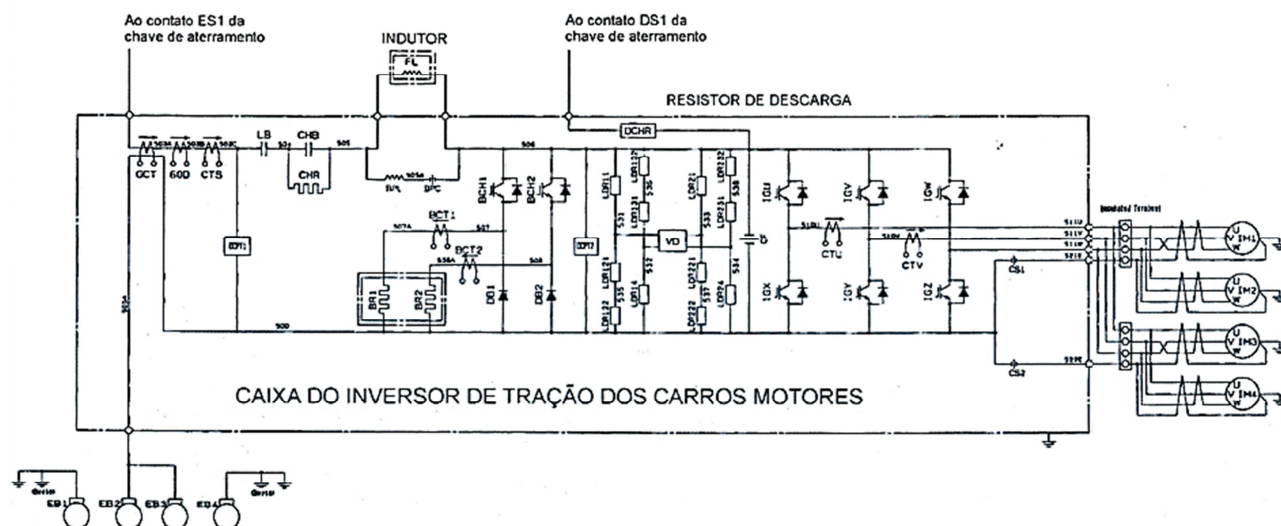
Fonte: (Manual série 8000, 2015)

O controle do inversor gera um aumento na corrente do rotor até atingir o limite máximo do torque de frenagem, mantendo-o constante para velocidades inferiores a 70 km/h. Este controle é abordado no subcapítulo 3.6.5 que trata dos métodos de controle do inversor VVVF.

### 3.6.3 Princípios operacionais

O sistema de controle de tensão variável e frequência variável é denominado de Inversor VVVF que tem como principal função o controle da alimentação de cada motor de tração e o esforço de frenagem elétrica.

A frequência de saída é controlada pela sequência de comutação dos 6 transistores bipolares de porta isolada (IGBT's) onde, através do controle do acionador da porta, são ligados e desligados. A Figura 16 é uma ilustração do inversor de tração.



**Figura 16 - Esquema do inversor de tração**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

Os modos de controle de tração, regeneração e de “em frente”, “para trás” são atingidos através do controle da frequência de escorregamento e da inversão de fase de saída trifásica, razão pela qual o inversor de tração elimina a necessidade de dispositivos eletromecânicos. O controle de direção do motor de tração é abordado no anexo C do presente trabalho.

A corrente CA e a tensão mudam de direção regularmente em períodos específicos, representando a mudança de direção e magnitude da corrente na sequência das fases de excitação U, V e W quando os IGBT's estão ligados/desligados com uma tensão aplicada ao inversor.

Para determinar o tempo de ligado/desligado do IGBT o modulador do inversor através de um microcomputador executa cálculos baseados em vários parâmetros, sendo apresentados no anexo A que trata sobre o controle da modulação e o anexo B que aborda os modos de pulso. Os diferentes modos de frenagem são apresentados no ANEXO D do presente trabalho.

### 3.6.4 Métodos de controle do inversor VVVF

#### Controle da velocidade do trem

O motor de indução trifásico do tipo gaiola empregado para um sistema de tração deve atender a necessidade de geração de torque alto no início do deslocamento, do controle de velocidade e de eficiência num intervalo de velocidade amplo. Para um melhor entendimento do controle de velocidade do trem, a Figura 17 apresenta a Curva geral característica de um sistema de tração e os modos do controle da velocidade do trem representados com letras de A a F.

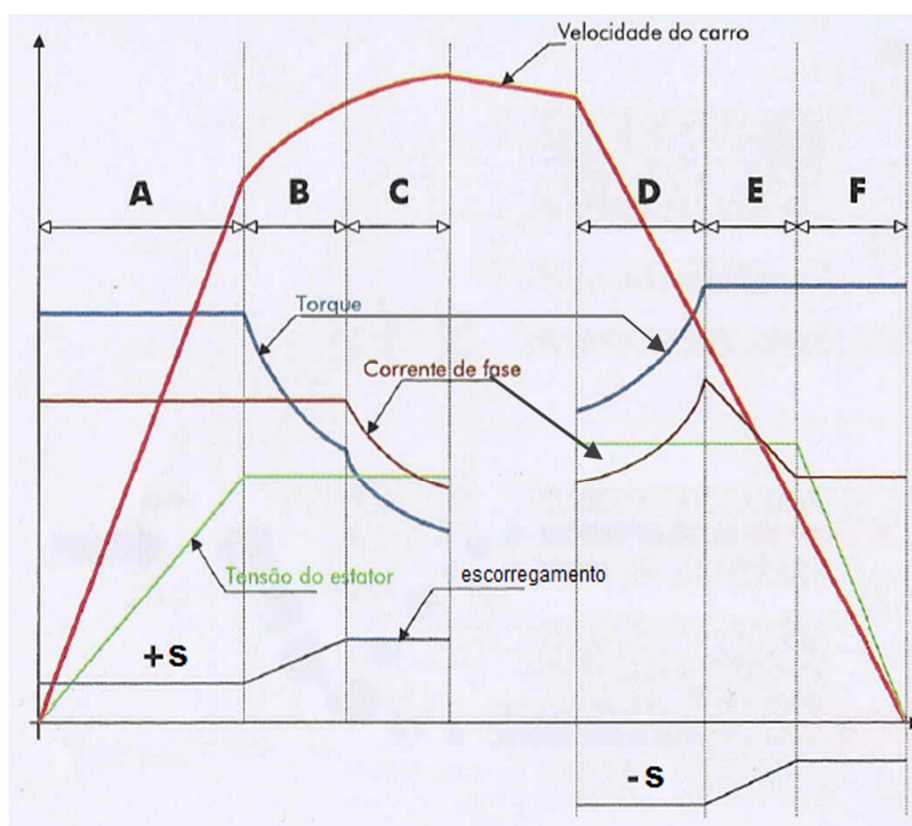


Figura 17 - Curva geral característica de um sistema de tração

Fonte: (Apostila Alstom, 2013)

#### Modo A - Controle de torque constante

Neste modo o torque e a aceleração são constantes. A relação  $V/F$  (tensão/frequência) e a frequência de escorregamento  $s$  se mantêm constantes. Para manter um torque elevado e constante, a tensão do estator aumenta proporcionalmente à velocidade do trem até atingir a tensão máxima de projeto do motor, após este ponto a relação  $V/F$  deixa de ser constante e consequentemente a aceleração do trem diminuirá.



**Modo B - Controle de potência constante**

Conhecido como modo de potência constante, pois a corrente e a tensão do rotor se mantêm constantes aumentando a taxa de escorregamento. Agora, a frequência de escorregamento aumenta proporcionalmente à velocidade do trem até atingir um limite, mantendo-se então constante do mesmo modo que a tensão do estator.

**Modo C - Controle de tensão constante**

O modo C é conhecido como sendo o modo de tensão constante, pois a tensão de alimentação, a frequência de escorregamento e a tensão do estator são constantes. O torque é produzido pelo aumento da frequência do inversor, porém é limitado pela curva característica do motor.

Os modos A, B e C são caracterizados como modos de tração. Conforme exposto, para obter aceleração do trem através do controle das variáveis do inversor. Inicialmente aumenta-se a tensão do estator até o ponto limite da tensão projetada para o motor (modo A); aumenta-se a frequência de escorregamento até um limite e mantém-se no limite (modo B); por último, aumenta-se a frequência do inversor (modo C). Os modos D, E e F são caracterizados como modos de frenagem e basicamente são reflexos dos modos de tração, porém na desaceleração do trem.

**Modo D - Controle de tensão constante em desaceleração**

O modo D é conhecido como sendo o modo de tensão constante em desaceleração, pois a frequência de escorregamento negativa e a tensão do estator são constantes. A corrente do rotor é aumentada até o torque máximo de frenagem ser atingido.

**Modo E - Controle de torque constante em desaceleração**

O modo E é o momento de torque de frenagem constante, sendo mantido com a redução da frequência de escorregamento ao valor máximo negativo.

**Modo F - Controle de torque constante em desaceleração**

Este modo mantém as características do modo E com torque constante, onde a frequência de escorregamento foi reduzida ao valor máximo negativo, porém diminui a tensão do estator proporcionalmente à velocidade do trem, mantendo assim o torque de frenagem constante.

#### 4 ANÁLISE DA FRENAGEM REGENERATIVA DOS TRENS

A frenagem regenerativa é a transformação da energia cinética, proveniente da movimentação dinâmica do trem, em energia elétrica, através dos motores elétricos controlados pelo inversor de frequência para desacelerar o trem em movimento, tornando os motores em geradores, consumindo e devolvendo ao sistema elétrico a energia elétrica regenerada.

O sistema de frenagem regenerativa apresenta diversas vantagens, sendo as principais:

Se o sistema de alimentação elétrica, no momento da frenagem regenerativa, estiver receptivo (com tensão de linha  $< 3500$  Vcc) a energia elétrica regenerada é absorvida por outro trem próximo no instante da desaceleração, isto é, disponibilizada para consumo no mesmo domínio da subestação que alimenta aquele trecho.

O trem que irá absorver esta energia poderá estar em aceleração na linha de circulação oposta ou poderá estar em aceleração na mesma linha quando o domínio da subestação é um trecho longo.

Se o sistema de alimentação elétrica, no momento da regeneração, não estiver receptivo (com tensão de linha  $> 3500$  Vcc) a energia elétrica regenerada é dissipada na forma de calor através dos bancos de resistores comandados pelo chopper de frenagem e inseridos no lado DC do inversor de tração.

O Capacitor de filtro do circuito intermediário do inversor, é quem limita a tensão de até  $3500$  Vcc para regeneração. O Capacitor de filtro é usado em conjunto com o Indutor de filtro, filtrando a corrente de linha principal e estabilizando a tensão para a operação do inversor de tração, evitando assim que os harmônicos da corrente de linha principal penetrem, a partir da catenária, no inversor.

A frenagem eletrodinâmica, sob o ponto de vista do operador (maquinista) torna a condução do trem, durante as desacelerações, mais confortável, por apresentar um esforço de frenagem controlado, com maior suavidade, além da segurança por

apresentar maior confiabilidade, em relação aos trens antigos não equipados com frenagem elétrica, menor utilização do sistema de freio de atrito, economizando ar comprimido produzido pelo trem, pastilhas e discos de freio, além dos outros componentes do sistema de freio, pois diminui a intervenção da manutenção e aumenta a vida útil destes componentes.

#### **4.1 Descrição dos trens com frenagem regenerativa**

Os trens operacionais da CPTM com motorização em corrente alternada CA e sistema de regeneração de energia representam 61 % da frota total e estão divididos em 7 séries, sendo 14 trens série 2000; 5 trens série 2070; 4 trens série 3000; 38 trens série 7000; 8 trens série 7500; 36 trens série 8000; 9 trens série 9000. No Apêndice deste trabalho há uma descrição de cada trem e suas características.

Todos os trens possuem 8 carros, sendo 4 carros reboques e 4 carros motores. Os carros motores estão equipados com 1 motor por eixo, totalizando 4 motores por carro, sendo 16 motores por composição. Estas séries de trens são equipadas com controladores de tração onde dependendo da série são chamados de inversores ou conversores de tração. Estes equipamentos são responsáveis pela tração e frenagem elétrica com regeneração de energia.

A aquisição de novos trens para expandir a frota operacional ou substituir séries de trens obsoletas faz parte do processo de renovação e modernização dos serviços prestados em atendimento a crescente demanda de passageiros. A CPTM foi criada em 1992, passando a operar a frota de trens herdada das antigas operadoras CBTU e FEPASA, que trabalhavam com série de trens fabricados entre as décadas de 50 e 80.

A primeira série adquirida pela CPTM foi a série 2100, fabricado em 1974 sendo adaptado e reformado na Espanha e entregue para operação no Brasil em 1998. Esta série foi a primeira a oferecer aos passageiros, ar condicionado nos salões, aumentando o conforto dos clientes. A partir do ano 2000, todas as séries de trens adquiridas são novas, possuem sistema de ar condicionado e trabalham com motor em corrente alternada.

A lotação (quantidade de passageiros transportados) para uma composição é de aproximadamente 2000 pessoas sentadas e em pé, considerando a taxa de ocupação de 6 passageiros/m<sup>2</sup> e pode chegar a 2500 pessoas se for considerado uma taxa de ocupação de 8 passageiros/m<sup>2</sup>. O acréscimo de peso considerando as taxas de ocupação é respectivamente de 140 toneladas e 180 toneladas por trem.

O diâmetro da roda pode variar de 863 mm a 915 mm dependendo da série. Todos os trens novos são regulados para as seguintes taxas de operação:

Aceleração máxima: 0,9 m/s<sup>2</sup>

Desaceleração máxima em freio de serviço: 0,77 m/s<sup>2</sup>

Desaceleração máxima em freio emergência: 1,1 m/s<sup>2</sup>

## **4.2 A Frenagem regenerativa dos trens da CPTM**

Alguns estudos e ensaios já realizados na CPTM demonstram que os trens dotados da tecnologia de frenagem regenerativa comprovam a capacidade de economizar energia, devolvendo à linha de alimentação elétrica, quando receptiva, a energia regenerada para consumo em outros trens que compartilham o mesmo trecho de rede aérea, além de economizar energia na frenagem mecânica de atrito.

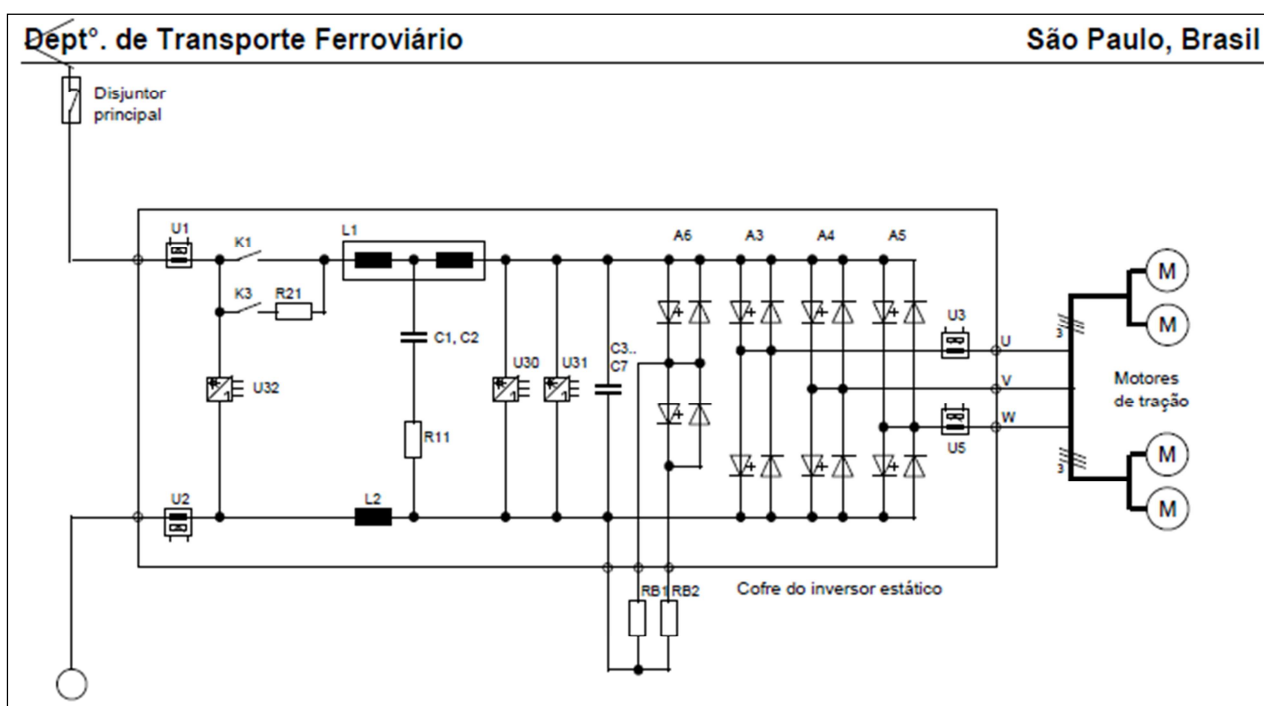
Em 2000/2001 a CPTM comprou 5 trens, denominada série 3000, da empresa Siemens.

Foi elaborado um relatório da simulação (SIEMENS, 2001) sobre o comportamento dinâmico do trem nas linhas operacionais da CPTM onde apresentou as características dos equipamentos de tração do trem, os cálculos das resistências ao movimento, as curvas características de força de tração e os resultados da simulação de percurso.

Para este trabalho foi considerado carga máxima de transporte (8 pessoas por m<sup>2</sup>), trecho tangente e nível, aderência completa entre as rodas e os trilhos e tensão de rede entre 2,7 kV a 3,6 kV.

O relatório abordou sobre o freio eletrodinâmico e frenagem regenerativa apenas na simulação, limitando-se a dizer que normalmente a energia de frenagem é regenerada na catenária e quando não absorvida, a energia de frenagem é convertida em calor em um resistor de frenagem e que a transição gradual entre o modo de operação de regeneração e o modo de frenagem reostático é automática (SIEMENS, 2001).

A Figura 18 é a ilustração do inversor de tração da série 3000.



**Figura 18 - Esquema do circuito do inversor de tração série 3000**

Fonte: (Siemens, 2001)

A série 3000 é dotada de inversores de tração controlados por um ondulator por pulsação com tiristores comutáveis pela gatilho (GTO's).

Em 2006 a equipe do material rodante responsável pela manutenção dos trens operacionais das linhas 11 e 12, apresentou um trabalho sobre o consumo e regeneração de energia na linha 11 (CPTM/GOR/DORÉ, 2006) onde realizaram ensaios com um trem da série 2000 no trecho de 24 km, denominado Expresso Leste, entre as estações Luz e Guaianazes.

O trabalho chegou à conclusão que na linha Expresso Leste, a economia mensal no consumo de energia elétrica, utilizando-se a frenagem regenerativa, é de aproximadamente 25 % em relação a energia total consumida.

A série 2000 é dotada de inversores de tração de controle VVVF com tiristores GTO's e sistema integral de comando e diagnose do trem, denominado MITRAC.

Este sistema é capaz de controlar todos os equipamentos do trem, permitindo a geração de ordem do esforço de tração e frenagem elétrica e/ou pneumática, controle da velocidade e aceleração, colocação em marcha de forma automática ou manual, instrumentos de medida e parâmetros como, energia de linha, consumida ou recuperada, além de supervisionar a antipatinagem e o antideslizamento, assim como a recuperação de energia em frenagem.

Uma importante observação apresentada trata sobre os problemas técnicos que surgiram no início da operação desta série onde a grande demanda de energia consumida na aceleração, principalmente durante as saídas simultâneas dos trens em operação nas estações, desarmavam constantemente os disjuntores de 3 kVcc das subestações.

A razão deste problema é que o sistema de alimentação de tração foi dimensionado inicialmente para uma menor quantidade de trens em circulação e intervalos entre trens maiores que os praticados atualmente, ou seja, a demanda de energia foi maior do que a esperada.

Para atender a quantidade de passageiros transportados são necessários mais trens em circulação com intervalos menores entre trens, consequentemente consumindo mais energia, superando a capacidade atual do sistema de alimentação elétrica de tração.

A solução encontrada foi operar os trens através de um comando que reduz a intensidade de corrente nos motores, isto é, os motores trabalham com a limitação de 50 % de sua capacidade, assim os trens da série 2000 operam com corrente máxima de 600 A.

Ficou estabelecido que todos os trens com motores de tração em corrente alternada operem com esta limitação, pois apesar das melhorias e aumento de capacidade do sistema de alimentação de tração atual, aumentou-se também a quantidade de trens operacionais. Esta condição de intensidade reduzida prevalece até hoje e a limitação varia para cada série.

Com esta limitação, os valores das correntes de partida são menores, diminuindo o consumo de energia de pico, porém aumentando o tempo de circulação dos trens, pois para atingir a velocidade máxima são necessários maiores distâncias e maior tempo em aceleração.

Contudo, a operação dos trens com essa limitação de potência (50 %), ao longo do tempo, possui o mesmo consumo energético que a operação com intensidade plena (100 %), pois para atingir uma velocidade pré-fixada ou máxima, o trem estará em aceleração durante um tempo maior.

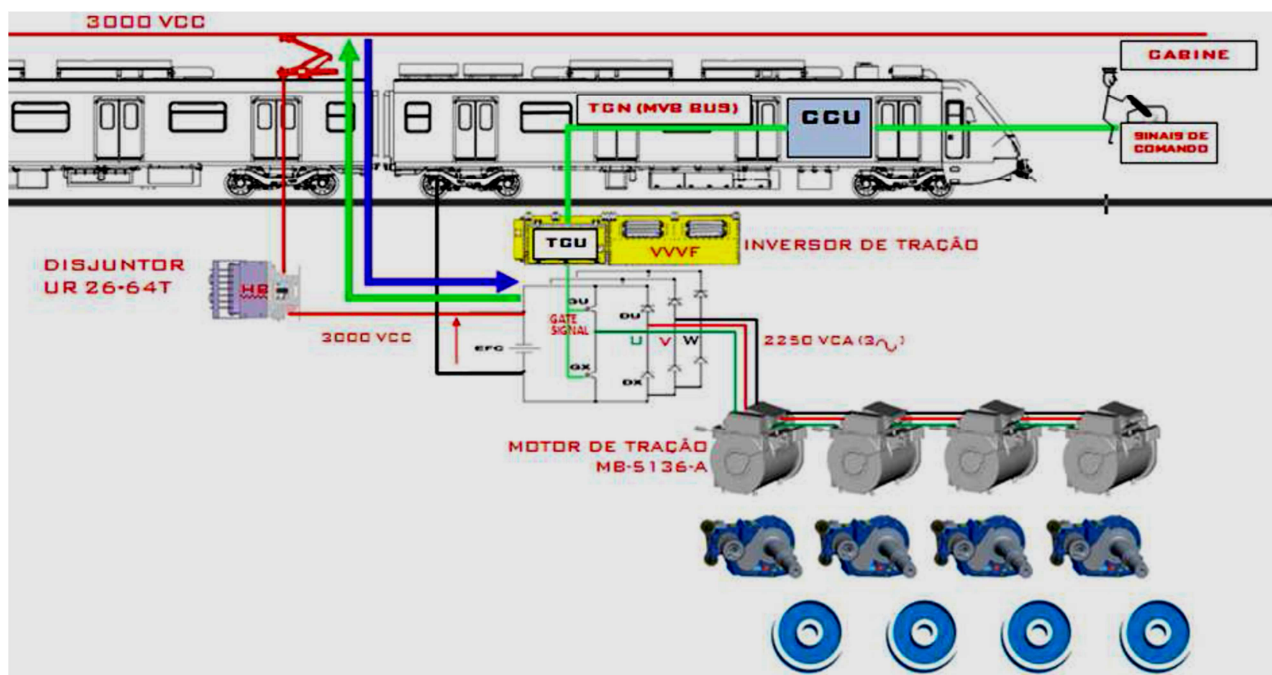
Em 2011 a equipe responsável pela manutenção dos trens das linhas 11 e 12 realizou um novo trabalho (CPTM/GOR/DORE, 2011) com o objetivo de medir a energia regenerada pelo sistema de frenagem regenerativa dos trens da série 7000.

Os ensaios foram realizados na linha 12 – Safira, com extensão total de 38,72 km, variação de altitude entre 731 e 742 m, carregamento de passageiros variável durante todo o percurso, tempo de parada nas estações de 33 s, sendo os registros coletados nos períodos de maior lotação. A velocidade média comercial medida nos ensaios foi de 42,24 km/h.

Na ocasião, realizaram duas viagens completas, em horários de pico, sendo a primeira viagem no período da manhã e a segunda viagem no período da tarde.

Após os ensaios realizados, dos resultados apresentados, destacam-se: Através da integração dos dados do registrador de eventos dos trens da série 7000, denominado TELOC 1500, foi estabelecido o percentual dos estados em que o trem se manteve durante o percurso, sendo na média geral dos ensaios, 43,47 % do percurso em tração, 40,89 % em deriva e 15,64 % em frenagem durante o percurso.

Os trens da série 7000 são formados por dois TUE's de 4 carros, totalizando 8 carros, onde os 4 carros motores possuem 4 motores CA de 260 kW, totalizando 16 motores por composição. Para controlar estes motores são necessários 4 inversores de tração VVVF com tiristores IGBT's, conforme ilustra a Figura 19.



**Figura 19 - Ilustração dos equipamentos de tração da série 7000**

Fonte: (CPTM/GOR/DORE, 2011)

Utilizando-se das variáveis disponibilizadas pelo próprio sistema de controle do inversor de tração, foi possível obter os resultados finais da energia consumida em tração e da energia regenerada pela frenagem elétrica, conforme apresentado na Tabela 1 através dos resultados totais por viagem e a porcentagem entre a energia consumida e regenerada pelo trem.

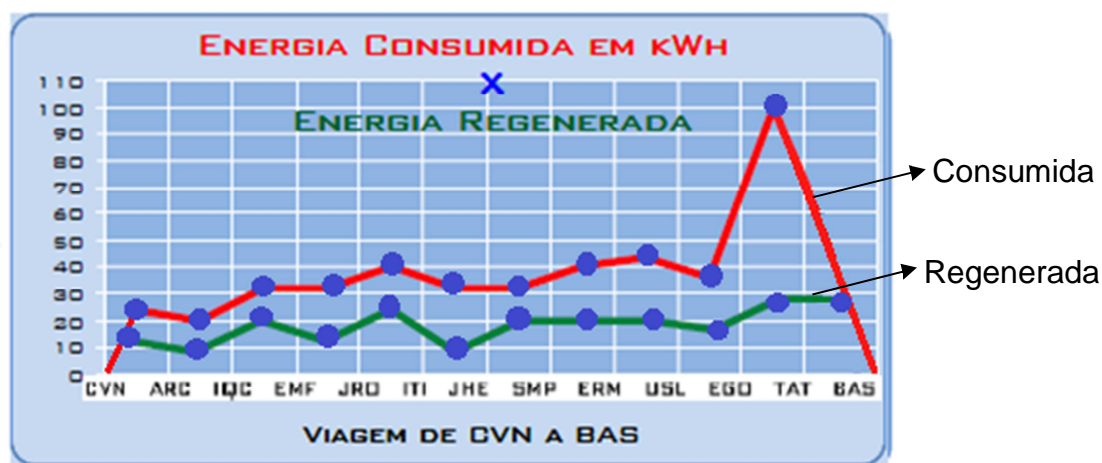
**Tabela 1 - Resultados da energia consumida e regenerada**

Total de energia por viagem	Calmon Viana à Brás	Brás à Calmon Viana
Consumida em tração	476 kWh	480 kWh
Regenerada (devolvida à rede)	216 kWh	216 kWh
Relação entre as energias	45,38 %	45 %

Nestes ensaios não foram considerados os valores de energia consumidos pelos conversores auxiliares (CVS) do trem, apenas o consumo em tração e a quantidade de energia devolvida à rede para cada viagem realizada.



Os valores obtidos da energia consumida em tração e da energia regenerada pelo trem são representados na Figura 20 onde é possível visualizar a variação de energia consumida e regenerada em cada trecho entre estações em uma viagem completa da estação Calmon Viana (CVN) até a Estação Brás (BAS).



**Figura 20 - Gráfico do resultado Viagem de Calmon Viana à Brás**  
Fonte: (CPTM/GOR/DORE, 2011)

Os valores apresentados demonstram a realidade operacional do percurso, com taxa de ocupação variável, perfil da via, espaços percorridos distintos em diferentes velocidades. Foram apresentados índices reais da taxa de ocupação dos trens com a variação do peso dos passageiros em cada trecho entre estações, sendo alterado durante as paradas nas estações.

O menor valor registrado foi na estação Aracaré (extremo leste de São Paulo) com 19 toneladas e taxa de ocupação de 0,8 passageiros/m<sup>2</sup> e o maior valor registrado foi na estação Eng. Goulart com 185 toneladas e taxa de ocupação de 8,1 passageiros/m<sup>2</sup> no período da tarde.

A coleta de dados referentes a variação do peso dos carros de um trem, durante a viagem, auxilia as equipes de manutenção quanto a distribuição desta carga por eixo do trem e a influência deste peso na via. Também auxiliam a operação, no monitoramento dos fluxos de passageiros, na disponibilidade de trens para alcançar menores taxas de ocupações nos trechos entre estações de maior movimento, aumentando o conforto dos usuários e a capacidade de carregamento.

Foi citado no trabalho sobre o índice de consumo específico de energia elétrica, adotado pela CPTM como exigência na aquisição de novos trens. O índice deverá ser calculado de acordo com as seguintes premissas:

- Espaço percorrido em um trecho (espaço igual a 1 km) na via em tangente e nível;
- Todos os carros do trem com carga de 6 passageiros/m<sup>2</sup>;
- Velocidade máxima do trecho igual a 90 km/h;
- O trem necessariamente deverá atingir esta velocidade e mantê-la até iniciar a frenagem de parada;
- Máxima aceleração de partida;
- Máxima desaceleração de frenagem;
- Desconsiderar a energia regenerada;
- Desconsiderar a energia consumida nos sistemas auxiliares do trem;
- Tensão da rede aérea em 3.000 V.

O Índice de Consumo Específico de Energia Elétrica exigido para o trem ( $I_e$ ) é representado conforme a Equação 3.

$$I_e = \frac{\text{Energia elétrica consumida pelo trem em um trecho (em Wh)}}{\text{Peso do trem (em toneladas)} \times \text{Comprimento do trecho (em km)}}$$

#### **Equação 3 - Índice de consumo específico de energia elétrica**

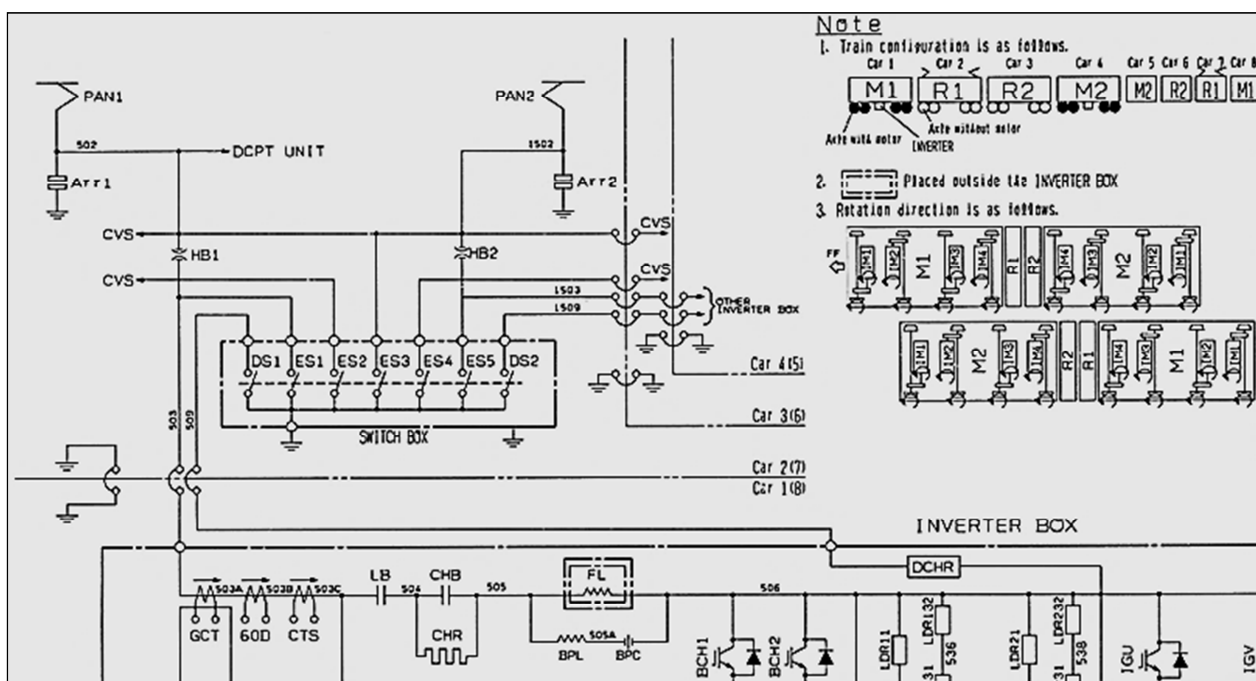
O trem especificado não deverá ultrapassar o valor de  $I_e = 60 \text{ Wh / toneladas} \times \text{km}$  para aceitação do modelo. O projetista deverá fornecer o Índice de consumo específico de energia elétrica ( $I_e$ ) do trem proposto e também o ciclo de trabalho sobre o qual o índice foi obtido (CPTM, ET AO3244-7, 2009).

### **4.3 Eficácia do freio regenerativo dos trens da CPTM**

Os trens consomem energia a todo instante, quando estão parados nos pátios aguardando liberação para entrar em operação, nas paradas em estações terminais ou estações intermediárias, pois necessitam de alimentação elétrica para manter ligados seus equipamentos e manter o carregamento das baterias.

Durante o deslocamento em aceleração, o trem consome energia alimentando os motores de tração e as cargas alimentadas pelo conversor estático. No momento das desacelerações quando os motores passam para o modo gerador devolvendo energia para a rede aérea, os demais equipamentos que são alimentados pelo conversor estático continuam funcionando, comprovando que durante a frenagem regenerativa, o próprio trem se beneficia desta energia devolvida.

Analisando o diagrama do circuito de alimentação principal da série 8000 representado na Figura 21 é possível observar o caminho da energia a partir do pantógrafo até o inversor de tração. O circuito do inversor de tração completo é apresentado no Anexo E do presente trabalho.



**Figura 21 - Detalhe do diagrama do circuito de alimentação principal alta tensão**

Fonte: (Manual série 8000)

A energia de 3 kVcc fornecida pelo fio de contato (rede aérea), captada pelo pantógrafo passa pelos seguintes componentes:

Para-raios, projetado para proteger a composição de sobrecargas atmosféricas que possam atingir o trem, pelo Detector de tensão de rede (3 kVcc), pelo Disjuntor de alta velocidade, pela caixa de aterramento e descarga, utilizada para intervenção da manutenção nos equipamentos e também pelos conversores estáticos.

A partir do momento que o contato principal do disjuntor está fechado, a energia passa a alimentar o inversor de tração no modo motor, ou seja, consumindo energia da rede, durante a aceleração.

Os conversores estáticos auxiliares consomem energia para alimentar os demais equipamentos elétricos do trem, com o trem em movimento ou parado, enquanto o trem estiver ligado. Durante a desaceleração, os motores de tração, através do controle do inversor de tração, passam para o modo gerador.

Uma vez reconhecida que a tensão da rede é receptiva ( $V < 3500 \text{ Vcc}$ ), o inversor devolve a energia gerada, pelo mesmo circuito de alimentação, passando pelo disjuntor, alimentando os conversores estáticos e retornando à rede. Caso contrário, com a rede não receptiva, a tensão excedente é dissipada nos resistores do chopper de frenagem.

Situação idêntica ocorre quando há inversão de cabine e o outro pantógrafo é energizado, alimentando os componentes que estão no mesmo circuito até chegar ao inversor de tração.

O melhor aproveitamento da energia devolvida à rede aérea, isto é, a maior redução do consumo de energia, se dá no momento em que dois ou mais trens estão ocupando o mesmo trecho entre subestações, sendo que no mínimo um trem em frenagem e outro em aceleração.

Estas desacelerações ocorrem ao longo da linha durante a viagem, tanto nas paradas em estações como em curvas, declives, restrições de velocidade de via impostas pela operação, por exemplo, passagens de nível ou obras nas vias adjacentes.

Com o trem monitorado, foi possível medir o consumo de energia total, sendo o consumo de energia nos motores de tração, do circuito auxiliar e a energia regenerada.

A série escolhida para os monitoramentos foi a série 8000 que atende a operação comercial da linha 8 Diamante. A Figura 22 representa um trem desta série.



**Figura 22 - Trem da série 8000**  
Fonte: (WebCPTM, 2015)

Os trens da série 8000 estão dotados com um equipamento de comando e monitoramento de todos os sistemas do trem, entre eles os sistemas de tração e frenagem do trem.

O equipamento denominado COSMOS é um sistema modular de controle e supervisão de veículo baseado no standard de comunicação Train Communication Network (TCN), constituída de barramentos Multifunction Vehicle Bus (MVB) onde todos os sistemas estão conectados, permitindo o compartilhamento de dados e informações dentro de um veículo, através de seus canais de entrada e saída e da execução da lógica de programação do veículo.

Nas cabines dos trens há uma Interface Homem-Máquina (HMI), isto é, um painel, denominado Registrador de Eventos, onde é possível visualizar o estado dos principais sistemas do veículo, além de permitir a inserção de parâmetros de condução e configuração do veículo.

O COSMOS realiza a leitura do funcionamento do inversor de tração a todo instante, registrando somente as ocorrências. O inversor de tração é dotado de diversos sensores e transdutores para informar ao COSMOS o estado de cada equipamento, através de inúmeras variáveis analógicas e/ou digitais.

Os canais estão dispostos em módulos de entrada e saída digitais e analógicas e de comunicação serial RS232 distribuídos ao longo de todo o veículo para captar o estado de todos os sistemas do trem e atuar de acordo com a lógica programada das Unidades Centrais de Controle (CCU).

O CCU também executa a supervisão, o monitoramento e o registro do comportamento do veículo, onde as diferentes falhas ou avarias que podem ocorrer durante o funcionamento do trem são gravadas, gerando um histórico de ocorrências para que a equipe de manutenção atue nos componentes causadores de maneira eficaz.

O operador de trem interage com o veículo através do registrador de eventos, acessando as telas de condução, incidências e comandos para o trem. A equipe de manutenção possui permissão para as telas de acesso restrito, como por exemplo, as telas de equipamentos, alarmes, históricos, parâmetros e programação.

Para descarregar os registros do histórico de ocorrências é necessário conectar um computador portátil, via conexão ethernet, ao COSMOS e acessar o sistema com a utilização de um software de manutenção específico, denominado Configurador. Com este programa também é possível modificar alguns parâmetros como hora, data, número de trem, além de atualizar o programa do registrador de eventos.

#### **4.4 Monitoramento da frenagem regenerativa em trens operacionais linha 8**

Os monitoramentos foram realizados em setembro de 2015, em dias e horários diferenciados com o intuito de comparar as variações características da operação através do monitoramento e registro dos parâmetros selecionados para obtenção de dados e posterior análise.

Ao final de cada monitoramento foi possível gerar uma tabela com a soma de todos os equipamentos monitorados, isto é, somando as variáveis de todos os carros da composição para cada tipo de monitoramento, resultando em valores absolutos, o consumo de energia elétrica de tração, o consumo de energia para alimentar os demais componentes do trem e a quantidade de energia regenerada durante o trajeto percorrido. O peso do trem vazio é de 338 toneladas na série 8000.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos monitoramentos por viagens e a Tabela 3 indica quais foram os dias e horários desses monitoramentos por sentido da viagem realizada.

**Tabela 2 - Resultados das Viagens Monitoradas**

Viagens monitoradas	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º
Energia gasta para movimentar o trem (kWh)	568,4	569,4	626,3	595,9	696,0	460,1	730,4	613,0
Energia gasta pelo trem (Auxiliar) (kWh)	219,1	196,1	206,6	207,9	221,3	51,4	363,7	307,6
Energia regenerada pelo trem (kWh)	226,3	223,5	250,1	241,6	259,9	225,6	331,9	248,8
Espaço percorrido pelo trem durante a viagem (km)	33,0	35,0	36,0	35,0	36,0	26,0	34,0	35,0
Tempo gasto durante a viagem (movimento) (min)	44,3	45,8	44,4	45,6	45,9	31,7	44,2	46,3
Tempo gasto durante a viagem (parado) (min)	8,6	7,9	17,2	9,8	11,6	5,9	10,3	12,3
Peso médio durante a viagem (toneladas)	373,4	361,5	361,9	359,4	437,5	361,9	423,3	389,9

**Tabela 3 - Dias e horários das viagens monitoradas**

Viagens	Horários	Resultados do monitoramento em cada viagem
1º	<b>14:10 e 15:03 h</b>	Dia 02/09/15, período da tarde - Sentido Itapevi
2º	<b>15:04 e 15:58 h</b>	Dia 02/09/15, período da tarde - Sentido Júlio Prestes
3º	<b>19:47 e 20:49 h</b>	Dia 02/09/15, período da noite - Sentido Itapevi
4º	<b>18:51 e 19:46 h</b>	Dia 02/09/15, período da noite - Sentido Júlio Prestes
5º	<b>06:22 e 07:19 h</b>	Dia 03/09/15, período da manhã - Sentido Júlio Prestes
6º	<b>07:21 e 07:59 h</b>	Dia 03/09/15, período da manhã - Sentido Itapevi
7º	<b>17:19 e 18:14 h</b>	Dia 16/09/15, período da tarde - Sentido Itapevi
8º	<b>18:15 e 19:13 h</b>	Dia 16/09/15, período da tarde - Sentido Júlio Prestes

Foi utilizado um computador portátil, conectado via cabo ethernet ao Registrador de eventos, na cabine de condução do trem S028, carro 8025. Com um programa de monitoramento e registro, denominado TimOn, foi iniciada uma programação pré-

estabelecida, inserida no computador portátil, com tempo de amostragem de 256 ms e com as seguintes variáveis de monitoramento:

TCU_Power_Consumption	= Consumo de energia durante a tração
CVS_ICA	= Consumo de energia do inversor estático auxiliar
TCU_Power_Regen	= Quantidade de energia regenerada
REG_TotKM	= Distância percorrida pelo trem durante a viagem
TIME	= Tempo registrado durante a viagem
I2R_REL_0KMH	= Tempo do trem parado
CCU_TRAIN_WEIGHT	= Peso médio com variável número de passageiros

Além das variáveis apresentadas acima, outras três importantes variáveis foram inseridas na programação do monitoramento, auxiliando as análises do consumo de energia elétrica do trem:

CCU_Speed	= Velocidade do trem
TCU_Line_Voltage_DCPT1	= Tensão de linha
TCU_Line_Current_CTS	= Corrente de linha

No dia 02 de setembro de 2015, quarta-feira, durante o monitoramento da tarde, circulavam 15 trens na linha 8 com intervalo programado de 8 minutos entre os trens para atender o vale operacional. Durante este monitoramento a temperatura externa foi de 26 °C diminuindo para 24 °C à noite.

O monitoramento no período da noite passou pela transição entre o pico da tarde com 20 trens em circulação e 6 minutos de intervalo programado para o pós-pico com 13 trens em circulação e 10 minutos de intervalo programado entre os trens.

Analisando os resultados encontrados nos dois períodos de monitoramento do dia 02 de setembro, observa-se que não houve alterações significativas no consumo de energia para movimentar o trem, no consumo de energia dos conversores estáticos, da variação de passageiros ou da quantidade de energia regenerada.



No dia seguinte, dia 03 de setembro de 2015, o trem S040 da série 8000 estava no abrigo de manutenção com programação para atender a operação no período da manhã, sendo equipado pela cabine do carro 8037, quando entrou em operação a partir da estação Itapevi, foi iniciado o programa de monitoramento e registro.

Na viagem de retorno, de Júlio Prestes até Itapevi, ocorreu uma falha no sistema de ar condicionado, impossibilitando a continuidade da composição em atendimento à programação operacional. A temperatura em São Paulo foi de 32 °C no momento da avaria, interrompendo o monitoramento de consumo de energia. Durante este monitoramento a operação contava com 20 trens e intervalo entre trens de 5 minutos.

Com o intuito de coletar mais dados para a análise, foi realizado novo monitoramento no dia 16 de setembro de 2015, uma quarta-feira, com o trem S064 que estava disponível no abrigo de manutenção em Presidente Altino, equipando a cabine do carro 8061. Neste dia, ao iniciar o monitoramento, circulavam pela linha 20 trens com intervalo de 6 minutos entre trens. As duas viagens foram iniciadas e concluídas durante o pico da tarde. A temperatura foi de 30 °C, sem chuva.

A Tabela 4 apresenta a média dos valores obtidos com os monitoramentos realizados, representando os valores médios das viagens completas realizadas pelos trens da série 8000 na linha 8.

<b>Tabela 4 - Valores Médios das viagens</b>	
<b>VALORES MÉDIOS DAS VIAGENS</b>	
Energia gasta para movimentar o trem <b>kWh</b>	<b>624,03</b>
Energia gasta pelo trem (Auxiliar) <b>kWh</b>	<b>244,93</b>
Energia regenerada pelo trem <b>kWh</b>	<b>252,51</b>
Espaço percorrido pelo trem durante a viagem <b>km</b>	<b>34,875</b>
Tempo gasto durante a viagem (em movimento) <b>Minutos</b>	<b>45,303</b>
Tempo gasto durante a viagem (parado) <b>Minutos</b>	<b>10,961</b>
Peso médio durante a viagem <b>Toneladas</b>	<b>384,64</b>

Observando os valores médios obtidos através dos monitoramentos realizados, em diferentes dias e horários, com os trens que circulam na linha 8, é possível dizer:

Para movimentar um trem durante uma viagem da linha 8 são necessários consumir em média 624,03 kWh de energia elétrica.

A Quantidade de energia devolvida para o sistema de alimentação é de 252,51 kWh. Considerando somente a energia consumida e a energia regenerada pelo sistema de tração, chega-se a uma relação de 40,5 % de regeneração.

Porém, estes trens consomem uma considerável quantidade de energia para manterem-se ligados, e com o consumo dos diversos equipamentos elétricos, chegam a gastar em média 244,93 kWh por viagem. Logo, a real economia com o sistema de regeneração dos trens da linha 8, durante uma viagem, é de 29,06 %.

A influência da temperatura ambiente no consumo de energia do sistema de ar condicionado também impacta na energia gasta para alimentar o circuito auxiliar (conversores estáticos) do trem.

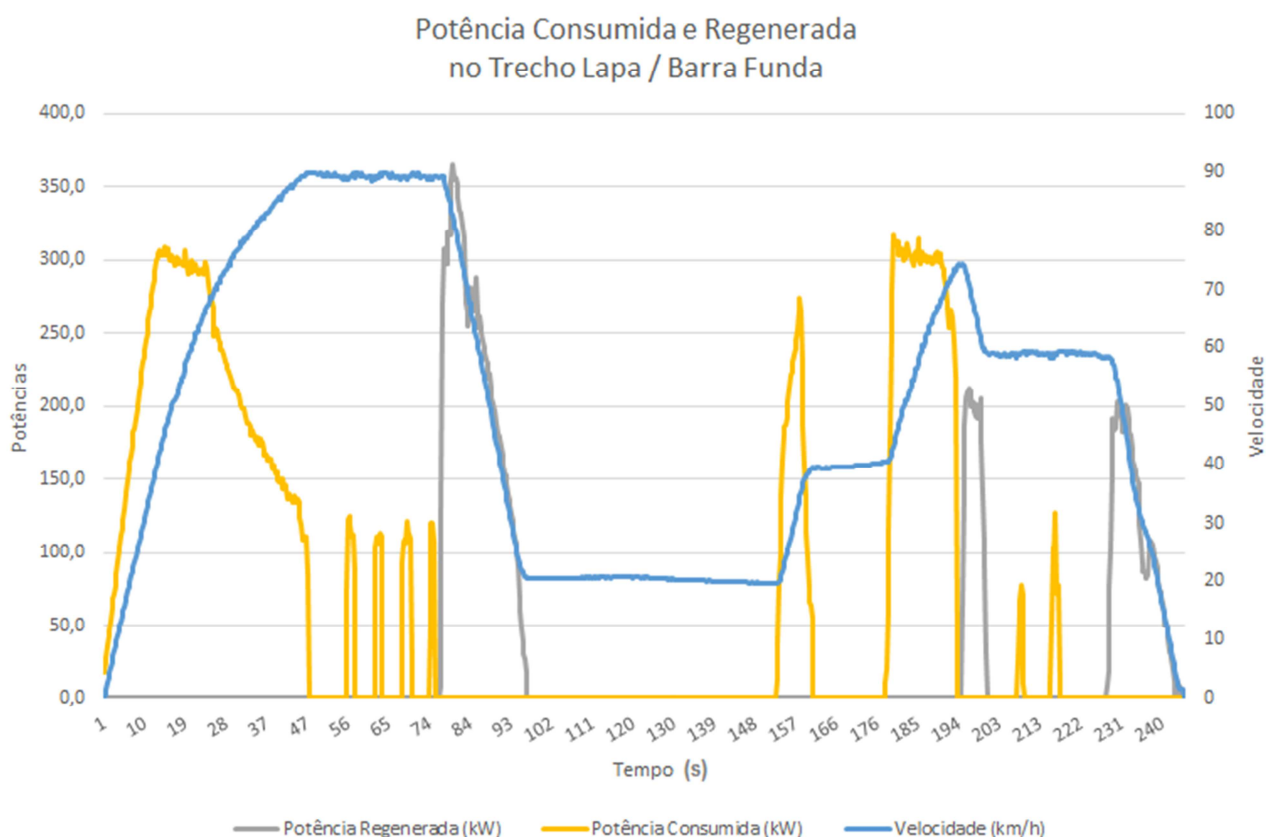
O peso médio obtido com o monitoramento realizado foi de 384,64 toneladas. Descontado o valor da tara do trem de 338 toneladas, o valor do peso de carregamento de passageiros é de 46,64 toneladas, ou seja, a taxa de ocupação é menor que 2 passageiros/m<sup>2</sup>.

Este valor se opõe a realidade pois foi distribuído por todas as viagens, trechos entre estações e horários de operação. Ainda há superlotação nos horários de pico, ultrapassando a taxa de 8 passageiros/m<sup>2</sup> em algumas viagens.

Foram realizados ao todo, 8 viagens nos dois sentidos em três dias de monitoramentos, com trens, horários, maquinistas e situações operacionais diferentes.

Os resultados demonstram que quanto maior for o carregamento de passageiros maior será a energia necessária para movimentar o trem, consequentemente o peso deste carregamento também contribuirá para uma maior quantidade de energia regenerada devolvida à rede de alimentação.

Foi escolhido o monitoramento do dia 02 de setembro no período da tarde, para representar conforme Figura 23, a potência consumida e regenerada no trecho de 3,35 km entre as estações Lapa e Barra Funda.



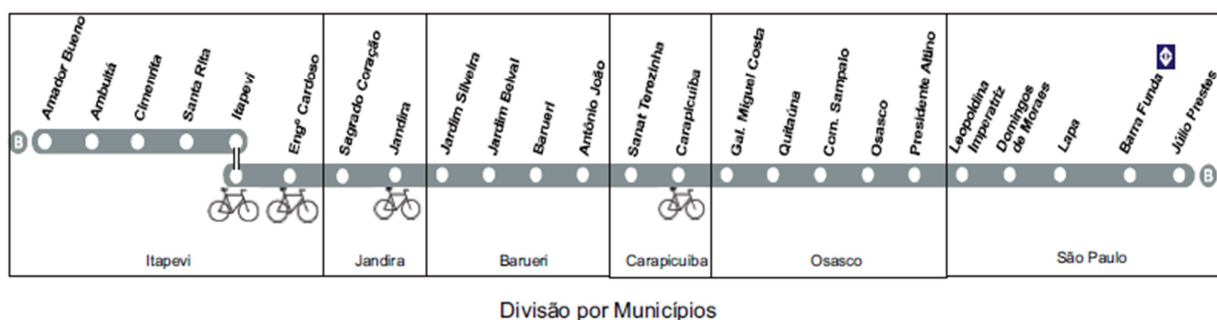
**Figura 23 - Potência Consumida e Regenerada Trecho Lapa / Barra Funda**

O trecho escolhido é plano e possui apenas 3 curvas suaves e foi percorrido em 4 minutos. A variação de velocidade apresentada é característica da condução por Velocidade Imposta VI, isto é, o Centro de Controle Operacional CCO é quem determina a velocidade que o maquinista deve atender durante a viagem.

Os valores das potências consumida e regenerada apresentados no gráfico foram extraídos das variáveis monitoradas no carro motor M1. Os valores das potências dos demais carros são similares ao apresentado, contudo dependem da variação do peso do carregamento de passageiros no próprio carro.

#### 4.5 Característica da linha 8 - Diamante

A linha 8 Diamante da CPTM possui 20 estações na linha de operação, atendendo a 6 municípios, onde 36 trens da série 8000 realizam a operação na linha principal com 35 km de percurso entre as estações Júlio Prestes até e Itapevi, onde são transportados em média, 458 mil passageiros nos dias úteis. A Figura 24 representa as estações e os municípios atendidos pela linha 8 – Diamante.



**Figura 24 - Mapa da linha 8 com divisão por municípios**

Fonte: (WebCPTM, 2015)

A linha 8 apresenta uma evolução no intervalo realizado entre trens passando de 5 minutos e 20 segundos em 2014 para 5 minutos e 03 segundos em 2015 no pico da manhã, com regularidade de 98 % de trens disponíveis para a operação.

O trecho escolhido para o monitoramento foi o trecho principal com o maior número de viagens, sendo 296 viagens programadas entre as estações terminais Júlio Prestes até Itapevi. O tempo previsto programado para completar uma viagem é de 53 min a uma velocidade comercial de 40 km/h.

Nos dias úteis são programadas no total 340 viagens para a linha 8 e o horário de operação é das 04h00 às 24h00.

A linha 8 possui uma distância média entre estações de 1,73 km. Com 24 estações, sendo 20 estações no trecho principal, um trem realiza a cada viagem completa no mínimo 39 desacelerações no trecho principal, considerando somente as desacelerações para parada em estações.

A Figura 25 representa as distâncias entre estações, diferenciando os municípios através de cores, sendo São Paulo na cor branca, Osasco na cor roxa, Carapicuíba na cor azul, Barueri na cor verde, Jandira na cor bege e Itapevi na cor amarela.

É possível observar na figura, nas células com valores em negrito, próximas da linha diagonal na cor cinza, as distâncias entre estações da linha 8.

O-D	JPR	BFU	LAB	DMD	ILE	PAL	OSA	CSA	QTU	GMC	CPB	STE	AJO	BRU	JBE	JSI	JDI	SCO	ICD	IPV
JPR		<b>2,97</b>	6,32	8,79	10,28	13,53	15,23	17,54	18,67	19,36	21,72	23,09	24,25	26,33	28,13	29,30	30,43	32,04	33,60	35,28
BFU	<b>2,97</b>		<b>3,35</b>	5,82	7,31	10,56	12,26	14,57	15,70	16,39	18,75	20,12	21,28	23,37	25,16	26,33	27,46	29,08	30,64	32,32
LAB	6,32	3,35		<b>2,47</b>	3,95	7,21	8,91	11,21	12,35	13,04	15,40	16,77	17,93	20,01	21,81	22,98	24,11	25,72	27,28	28,96
DMD	8,79	5,82	<b>2,47</b>		<b>1,48</b>	4,74	6,44	8,74	9,87	10,57	12,93	14,29	15,46	17,54	19,34	20,51	21,64	23,25	24,81	26,49
ILE	10,28	7,31	3,95	<b>1,48</b>		<b>3,25</b>	4,95	7,26	8,39	9,08	11,44	12,81	13,97	16,06	17,85	19,03	20,15	21,77	23,33	25,01
PAL	13,53	10,56	7,21	4,74	<b>3,25</b>		<b>1,70</b>	4,01	5,14	5,83	8,19	9,56	10,72	12,81	14,60	15,77	16,90	18,52	20,07	21,75
OSA	15,23	12,26	8,91	6,44	4,95	<b>1,70</b>		<b>2,31</b>	3,44	4,13	6,49	7,86	9,02	11,11	12,90	14,07	15,20	16,82	18,38	20,06
CSA	17,54	14,57	11,21	8,74	7,26	4,01	<b>2,31</b>		<b>1,13</b>	1,82	4,18	5,55	6,71	8,80	10,59	11,77	12,89	14,51	16,07	17,75
QTU	18,67	15,70	12,35	9,87	8,39	5,14	3,44	<b>1,13</b>		<b>0,69</b>	3,05	4,42	5,58	7,67	9,46	10,63	11,76	13,38	14,94	16,62
GMC	19,36	16,39	13,04	10,57	9,08	5,83	4,13	1,82	<b>0,69</b>		<b>2,36</b>	3,73	4,89	6,98	8,77	9,94	11,07	12,69	14,24	15,92
CPB	21,72	18,75	15,40	12,93	11,44	8,19	6,49	4,18	3,05	<b>2,36</b>		<b>1,37</b>	2,53	4,62	6,41	7,58	8,71	10,33	11,88	13,56
STE	23,09	20,12	16,77	14,29	12,81	9,56	7,86	5,55	4,42	3,73	<b>1,37</b>		<b>1,16</b>	3,25	5,04	6,21	7,34	8,96	10,52	12,20
AJO	24,25	21,28	17,93	15,46	13,97	10,72	9,02	6,71	5,58	4,89	2,53	<b>1,16</b>		<b>2,09</b>	3,88	5,05	6,18	7,80	9,36	11,04
BRU	26,33	23,37	20,01	17,54	16,06	12,81	11,11	8,80	7,67	6,98	4,62	3,25	<b>2,09</b>		<b>1,79</b>	2,97	4,10	5,71	7,27	8,95
JBE	28,13	25,16	21,81	19,34	17,85	14,60	12,90	10,59	9,46	8,77	6,41	5,04	3,88	<b>1,79</b>		<b>1,17</b>	2,30	3,92	5,48	7,16
JSI	29,30	26,33	22,98	20,51	19,03	15,77	14,07	11,77	10,63	9,94	7,58	6,21	5,05	2,97	<b>1,17</b>		<b>1,13</b>	2,74	4,30	5,98
JDI	30,43	27,46	24,11	21,64	20,15	16,90	15,20	12,89	11,76	11,07	8,71	7,34	6,18	4,10	2,30	<b>1,13</b>		<b>1,62</b>	3,17	4,85
SCO	32,04	29,08	25,72	23,25	21,77	18,52	16,82	14,51	13,38	12,69	10,33	8,96	7,80	5,71	3,92	2,74	<b>1,62</b>		<b>1,56</b>	3,24
ICD	33,60	30,64	27,28	24,81	23,33	20,07	18,38	16,07	14,94	14,24	11,88	10,52	9,36	7,27	5,48	4,30	3,17	<b>1,56</b>		<b>1,68</b>
IPV	35,28	32,32	28,96	26,49	25,01	21,75	20,06	17,75	16,62	15,92	13,56	12,20	11,04	8,95	7,16	5,98	4,85	3,24	<b>1,68</b>	

Figura 25 - Distâncias (km) entre estações da linha 8

Fonte: (WebCPTM, 2015)

A maior distância, entre as estações Barra Funda e Lapa B, corresponde a 3,35 km e a menor distância, entre as estações Quitaúna e General Miguel Costa, corresponde a 690 m.

Há pelo menos 3 estações de passageiros sob o domínio de uma subestação na linha 8. Com isso é possível deduzir que em diversos momentos da operação comercial, um trem ao regenerar energia durante uma desaceleração, devolve energia à rede, neste mesmo momento outro trem em aceleração absorve esta energia devolvida.

#### 4.6 Características do sistema de alimentação elétrica da linha 8

O sistema de alimentação elétrica de tração da linha 8 possui 6 subestações primárias recebendo 2 linhas de alta tensão (88 kV) diretamente da concessionária Eletropaulo e 5 cabines seccionadoras intercaladas entre as subestações e responsáveis por equilibrar as correntes solicitadas ou geradas pelos motores de tração.

As cabines da linha 8 são telecomandadas pelo CCO Brás através do Subsistema de Controle de Energia SCE.

A Figura 26 ilustra a localização das subestações que alimentam a linha 8.



**Figura 26 - Localização das Subestações da linha 8**

Fonte: (WebCPTM, 2015)

As subestações através de transformadores de alta potência, rebaixam as tensões das linhas de 88 kV para os níveis adequados de tensões dos retificadores de 3 kVcc.

Os retificadores transmitem a tensão de 3 kVcc para os disjuntores extra rápidos, sendo estes responsáveis diretamente pela alimentação da rede aérea de tração.

A linha 8 possui 3 cabines seccionadoras exclusivas à linha, Júlio Prestes, Lapa e Quitaúna, além de compartilhar energia com a linha 9 em outras 2 cabines seccionadoras, Presidente Altino e Osasco.

Também possui 6 subestações sendo a SE Barra Funda, SE imperatriz Leopoldina, SE Osasco, SE Santa Terezinha, SE Jandira e SE Santa Rita. A Tabela 6 apresenta a média consumida e a quantia paga por mês, além do total consumido e pago no ano pela energia do sistema de alimentação de tração da linha 8 em 2015.

A Tabela 5 apresenta os trechos de domínio entre cada subestação da Linha 8.

**Tabela 5 - Domínio das Subestações da Linha 8**

<b>DOMÍNIO</b> ← (m)	<b>SUBESTAÇÃO</b>	<b>DOMÍNIO</b> → (m)
4.013	Barra Funda	3.027
3.792	Leopoldina	4.732
4.583	Osasco	2.519
3.493	Santa Terezinha	4.074
4.928	Jandira	2.422
4.652	Santa Rita	3.067
O trecho de domínio das subestações, em média é de 7.550 m.		

Os trechos de domínio compreendem as extensões da rede aérea alimentadas pelas subestações até uma cabine seccionadora ou um seccionamento elétrico. Cada subestação possui seu relógio medidor de consumo, disponibilizado pela concessionária local.

O consumo mensal de energia elétrica da linha 8 em 2015 foi de 6.684.635,60 kWh média/mês. Nos meses com 22 dias úteis e 8 dias entre sábados e domingos, onde o número de viagens é menor, são programadas 9540 viagens.

**Tabela 6 - Média por mês e o total dos valores pagos e o consumo em 2015**

	<b>MÉDIA/MÊS</b>	<b>TOTAL ANO 2015</b>
<b>Consumo Total (kWh) ==&gt;</b>	6.684.635,60 kWh	<b>80.215.627,20 kWh</b>
<b>Total Pago com Consumo (R\$) ==&gt;</b>	R\$ 610.037,34	R\$ 7.320.448,12
<b>Total Pago pela Demanda ==&gt;</b>	R\$ 300.662,43	R\$ 3.607.949,17
<b>Total Pago pelas Ultrapassagens ==&gt;</b>	R\$ 4.023,92	R\$ 20.119,58
<b>Total Pago pelas Faturas ==&gt;</b>	R\$ 1.343.973,57	R\$ 16.127.682,89

De acordo com os resultados dos monitoramentos, um trem da série 8000, consome em média 589,85 kWh em tração, 221,7 kWh para os demais componentes e regenera 244,01 kWh de energia contribuindo com a frenagem regenerativa para o circuito de alimentação de tração durante sua viagem.

Considerando somente o gasto de energia de tração são necessários 5.953.246,2 kWh para completar todas as viagens programadas num mês.

Além da energia de tração, cada trem consome energia para alimentar outros equipamentos elétricos, como motores ventiladores de equipamentos, exaustores e condensadores do ar condicionado, motor compressor de ar para o circuito pneumático, etc.

A soma deste consumo é de 2.336.632,2 kWh gastos durante um mês dentre as 9540 viagens programadas. Sem a contribuição de 2.408.945,4 kWh de energia elétrica regenerada para a rede, o total gasto seria de 8.289.878,4 kWh, excedendo a média/mês do consumo total de energia elétrica de 6.684.635,60 kWh.

O total de energia elétrica consumida para completar as 9540 viagens com os trens da série 8000, considerando a média encontrada nos resultados dos monitoramentos e subtraindo a contribuição da frenagem regenerativa é de 5.880.933 kWh.

A diferença entre o consumo mensal de energia elétrica da linha 8 em 2015 (6.684.635,60 kWh) e o consumo médio dos trens (5.953.246,2 kWh) para completar as viagens programadas no mês é de 731.389,4 kWh.

Esta diferença é a quantidade mensal de energia gasta pelos trens da série 5400 utilizados na extensão da linha 8 que realizam diariamente 83 viagens entre as estações Itapevi e Amador Bueno. Esta extensão é alimentada pela SE Jandira.

#### **4.7 Redução de gastos no sistema de freio eletropneumático**

Os trens dotados do sistema de frenagem regenerativa economizam gastos com a manutenção de pastilhas de freio e dos discos de freio, da frenagem de atrito do trem, pois nos carros motores utilizam a frenagem eletrodinâmica nas desacelerações em velocidades altas, consumindo somente os equipamentos da frenagem mecânica nos carros reboques.



Esta economia se dá no maior tempo entre as substituições dos discos de freio das rodas em carros motores, em razão da utilização da frenagem eletrodinâmica nestes carros, onde somente quando atingem baixas velocidades utilizam a frenagem de atrito.

As Tabelas 7 e 8 comparam o consumo dos discos e pastilhas de freio dos carros motor e reboque do trem da série 8000.

**Tabela 7 - Consumo dos discos de freio série 8000**

Quilometragem média por mês [km]	10.000
Limite de uso do disco [mm]	5
Disco de Freio novo [mm]	135
Fim de vida útil do disco de freio [mm]	130
Média de desgaste mensal [mm] - Reboque	0,13
Média de desgaste mensal [mm] - Motor	0,01

**Tabela 8 - Consumo das pastilhas de freio série 8000**

Quilometragem média por mês [km]	10.000
Limite de uso do Pastilha [mm]	29
Pastilha de freio nova [mm]	35
Fim de vida útil da Pastilha de freio [mm]	6
Média de desgaste mensal [mm] - Reboque	3,29
Média de desgaste mensal [mm] - Motor	0,09

Um exemplo prático é que desde o início da operação dos trens série 8000, em 2012, não foram substituídos os discos e pastilhas de freio dos carros motores, somente há substituições de pastilhas e discos nos carros reboques, por dotarem apenas o sistema de frenagem mecânica.

Para cada roda do trem existe um conjunto do sistema de frenagem por atrito. Este conjunto é composto basicamente por uma pinça de freio que atua nas faces internas e externas das rodas onde estão instalados os discos de freio em ambos os lados. Cada lado da pinça de freio possui um cilindro pneumático e um ajustador de folga. Neles são instaladas as pastilhas de freio.

O custo médio para cada pastilha de freio nova é de R\$ 510,64 (em 2015). As pastilhas de freio são substituídas a cada 9 meses nos carros reboques, considerando valores médios e funcionamento normal do sistema de freio.

O custo médio de um disco de freio novo é de R\$ 8.230,00 (em 2015). Em média a vida útil do disco de freio reboque é de 3 anos.

Na Tabela 9 é apresentada a economia real dos discos e pastilhas do sistema de freio de atrito através da utilização da frenagem eletrodinâmica com regeneração de energia.

**Tabela 9 - Economia de freio com utilização da frenagem eletrodinâmica**

	<b>PASTILHAS DE FREIO</b>	<b>DISCOS DE FREIO</b>
Quantidade por trens	128	64
Quantidade por carro motor	64	32
Quantidade por carro reboque	64	32
Quantidade anual substituída por carro reboque	85,33	10,66
Quantidade anual substituída por carro motor	2,46 (*)	0,78 (*)
Custo unitário (Valores em R\$)	510,64	8.230,00
Gasto anual por carro reboque (Valores em R\$)	43.572,91	87.731,80
Gasto anual por carro motor (Valores em R\$)	1.256,18 (*)	6.419,40 (*)
<b>Economia de freio com utilização da frenagem eletrodinâmica (Valores em R\$)</b>	<b>42.316,73</b>	<b>81.312,40</b>

(\*) Estimativa

A economia anual nos gastos com o sistema de freio de atrito, utilizando a frenagem eletrodinâmica é de R\$123.629,13 para cada trem. Somando os 14 trens da Série 2100 com frenagem reostática, mais os 114 trens operacionais com frenagem regenerativa, é possível estimar que a economia anual desta frota com sistema de frenagem elétrica é de R\$ 16 milhões, ou seja, mensalmente não são gastos R\$ 1,3 milhões com substituições de pastilhas e discos de freio nos carros motores. Não foram considerados os custos de mão de obra, somente os gastos com materiais.

## 5 CONCLUSÃO

Como principais conclusões deste trabalho, destacam-se a importância do sistema de frenagem regenerativa nos trens da CPTM na redução do consumo de energia de alimentação do circuito de tração. Sem o sistema de frenagem regenerativa o consumo de energia de tração seria maior.

Através da devolução da energia regenerada, o valor pago com ultrapassagens de demanda é o menor possível, e o sistema de tração com regeneração de energia equilibra a distribuição desta energia ao longo do trecho, minimizando as correntes de pico de partida dos trens no momento das acelerações.

A redução do consumo de energia da CPTM na linha 8, com trens utilizando o sistema de freio regenerativo é de 2.408.945,4 kWh em média, durante um mês.

Considerando a variação dos valores pagos com energia elétrica nas faturas da linha 8, é possível estimar que a contribuição da frenagem regenerativa economiza aproximadamente R\$ 215.000,00, ou seja, R\$ 2.580.000,00 ao ano, somente em uma linha dentre 6 linhas operacionais.

Com os resultados dos monitoramentos apresentados é possível afirmar que um trem equipado com sistema de frenagem regenerativa é capaz de economizar até 30 % da energia elétrica gasta durante a tração numa linha operacional com intervalos entre trens de 5 a 10 minutos.

Para trabalhos futuros no âmbito dos temas abordados neste trabalho, recomenda-se estudos para melhoria do sistema de alimentação elétrica de tração, principalmente no aumento da capacidade do sistema atual, projetos para melhoria da distribuição, comando e controle da energia nas subestações, pois em breve todos os trens da frota CPTM estarão equipados com o sistema de frenagem regenerativa, os intervalos serão menores, haverá mais trens em circulação. Este cenário somente será realidade se houver investimento para aumentar a capacidade de fornecimento de energia.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRUDA, T. T.; BERNARDES, R. T.; SOUTO, A. J. S. **Estudo de caso de carregamento do sistema elétrico de tração da linha 9 – Esmeralda**. 2012. 80 fl. Monografia (Tecnologia Metroferroviária), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

ARTIBANI, E. B.; PRENDES L. R.; ALMEIDA, O. T.; **Gerenciamento técnico-operacional para minimizar o aumento de demanda no sistema de suprimento de energia elétrica de tração**. 2007. 72 fl. Monografia (Tecnologia Metroferroviária). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

FRANCESCHINI, E. O.; SOUTO, F. M.; SILVA, J. A. M.; **Estudo do desempenho dos motores de tração em corrente alternada nos trens da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos**. 2007. 33 fl. . Monografia (Tecnologia Metroferroviária). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

NASCIMENTO, P. C.; **Sistema de controle de frenagem para trens metropolitanos de tração elétrica**. 2012. 84 fl. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2012.

PIRES, C. L.; **Simulação do sistema de tração elétrica metro-ferroviária**, Tese (Doutorado), 2006. 212 fl. – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

SOUZA, C. A.; **Proposta de integração do sistema de automação de subestações retificadoras do sistema metrô-ferroviário brasileiro**. 2010. 63 fl. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

TAVARES, A. M.; FILHO, A. F. F.; OSÓRIO J. O. M.; BLAUTH, Y. B.; **Um estudo sobre a frenagem regenerativa de trens utilizando gerador linear de indução**. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Bonito – MS, 2010, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense. Rio Grande do Sul, 2010.

TERANISHI, M. R. **Análise probabilística da expectativa da vida operacional do fio de contato de uma rede aérea**. 2004. 36 fl. Monografia (Tecnologia Metroferroviária), Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

**WebCPTM:**

ALSTOM. **Motor de indução**. 48 p. 2013.

ALSTOM. **Verificação de Consumo do trem CPTM linha 11 (série 9000)**. 6 fl. 2010.

CAF. **Conversor auxiliar e carregador de baterias série 8000** – Manual de manutenção. 141 fl. 2015.

CAF. **Sistema de freio série 7500** – Guia rápido de utilização. 13 fl. 2016.

CAF. **Truques e inversor de Tração série 8000** – Manual de manutenção. 92 fl. 2015.

CPTM/GOR/DORE. **Consumo e regeneração de energia na linha “Expresso Leste”**. 17 p. 2006.

CPTM/GOR/DORE. **O caminho para o futuro com mais energia eficiente**. 27 p. 2011.

ET Especificação Técnica AO3244-7. **Trem de 8 carros tipo Open Wide Gangway (trem tubo)**. Material Rodante GOT. 184 p. 2009

GOF/GFH. **Visão sistêmica de subestações e cabinas seccionadoras e paralelismo**. 29 fl. 2010.

GOO/GOM. **Plano de redução de trens por subestação**. Out/2015.

PM Plano de Manutenção AA0347-8. **Pantógrafos AM57BU – Manutenção em abrigos**. 2015. Documentos Técnicos CPTM.

SIEMENS. **Concepção – Tração e dinâmica de movimento**. Versão 2.10. 22 p. 2001.

**Internet:**

ANPTrilhos. **Impactos do fornecimento de energia elétrica aos Sistemas Metroferroviários**, 2015. 19 p. 20º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito. Santos, SP. <http://anptrilhos.org.br/>  
Acesso em 22 de junho de 2015.

SIEMENS. **Sistemas de recuperação de energia**, 2013. 21 p. 19ª Semana de Tecnologia Metroferroviária. São Paulo, SP.  
[http://semana.aeamesp.org.br/19/SitePages/prgrm\\_sl4.aspx](http://semana.aeamesp.org.br/19/SitePages/prgrm_sl4.aspx)  
Acesso em 8 de outubro de 2015.

## GLOSSÁRIO

### **Consumidor**

Qualquer pessoa física ou jurídica que solicite à concessionária o fornecimento de energia elétrica e assume a responsabilidade pelo pagamento das faturas e demais obrigações fixadas em regulamento pela ANEEL.

### **Consumidor cativo**

Consumidor que é obrigado por lei a comprar energia elétrica somente da concessionária que opera na sua região.

### **Consumidor livre**

Todo consumidor que atendido em qualquer tensão tenha optado pela compra de energia elétrica conforme lei nº 9074 de 07 de julho de 2005.

### **Demanda contratada**

Demanda disponibilizada pela concessionária no ponto de entrega conforme valor e período de vigência fixados em contrato como valor mínimo para fins de faturamento independente de ser consumido ou não, porém pago pelo consumidor em sua totalidade.

### **Demanda de energia**

É a média das potências elétricas solicitadas ao sistema elétrico de distribuição em um determinado período de tempo.

### **Horário de ponta**

É o período de três horas consecutivas, definido pela concessionária, compreendido entre as 17h30 e 20h30, diariamente com exceção aos sábados, domingos e feriados.

### **Horário fora de ponta**

É o intervalo de tempo correspondente as horas complementares ao período definido no Horário de ponta.

**Rodeiro** é o nome dado ao conjunto de duas rodas, um eixo, caixas de rolamento e atuadores do freio mecânico. A diferença básica entre truque reboque e truque motor é a presença dos motores de tração no truque motor.

**Truque** é a denominação dada aos dois conjuntos mecânicos de sustentação da caixa do carro, composto de armação metálica, sistema de suspensão, sistema de freio mecânico e dois rodeiros.

## APÊNDICE

### **Série 2000**

Fabricante: CAF/ADTRANZ/ALSTOM

Origem: Espanha

Ano Fabricação/Operação: 1999/2000

Esforço Trator: 30000 kgf

Potência nominal do trem: 5316 kW

Modelo do motor: 6RIA 4555

Fabricante do motor: Bombardier (Suíça)

Potência nominal no eixo (saída): 300 kW

Peso total do trem vazio: 358,2 toneladas

### **Série 2070**

Fabricante: ALSTOM/BOMBARDIER/CAF

Origem: Brasil

Ano Fabricação/Operação: 2008/2008

Esforço Trator: 28000 kgf

Potência nominal do trem: 5484 kW

Modelo do motor: BT 6RIA 4555 A

Fabricante do motor: Bombardier (Suíça)

Potência nominal no eixo (saída): 300 kW e máxima de 375 kW

Peso total do trem vazio: 355,6 toneladas

### **Série 3000**

Fabricante: SIEMENS

Origem: Alemanha

Ano Fabricação/Operação: 2000/2001

Esforço Trator: 25000 kgf

Potência nominal do trem: 4688 kW

Modelo do motor: 1TB 2016

Fabricante do motor: Siemens (Alemanha)

Potência nominal no eixo (saída): 250 kW

Peso total do trem vazio: 322 toneladas



**Série 7000**

Fabricante: CAF

Origem: Espanha e Brasil

Ano Fabricação/Operação: 2009/2010

Esforço Trator: 28300 kgf

Potência nominal do trem: 4828 kW

Modelo do motor: MB 5136 A

Fabricante do motor: Mitsubishi Electric

Potência nominal no eixo (saída): 260 kW

Peso total do trem vazio: 358,2 toneladas

**Série 7500**

Fabricante: CAF

Origem: Brasil

Ano Fabricação/Operação: 2010/2011

Esforço Trator: 28300 kgf

Potência nominal do trem: 4828 kW

Modelo do motor: MB 5136 A

Fabricante do motor: Mitsubishi Electric

Potência nominal no eixo: 260 kW

Peso total do trem vazio: 350,5 toneladas

**Série 8000**

Fabricante: CAF

Origem: Brasil

Ano Fabricação/Operação: 2011/2012

Esforço Trator: 28000 kgf

Potência nominal do trem: 4925 kW

Modelo do motor: MB 5136 A

Fabricante do motor: Mitsubishi Electric

Potência nominal no eixo: 260 kW

Peso total do trem vazio: 341,6 toneladas

**Série 9000**

Fabricante: ALSTOM

Origem: Brasil

Ano Fabricação/Operação: 2012/2013

Esforço Trator: 26500 kgf

Potência nominal do trem: 4944 kW

Modelo do motor: 4 ECA 2142 B

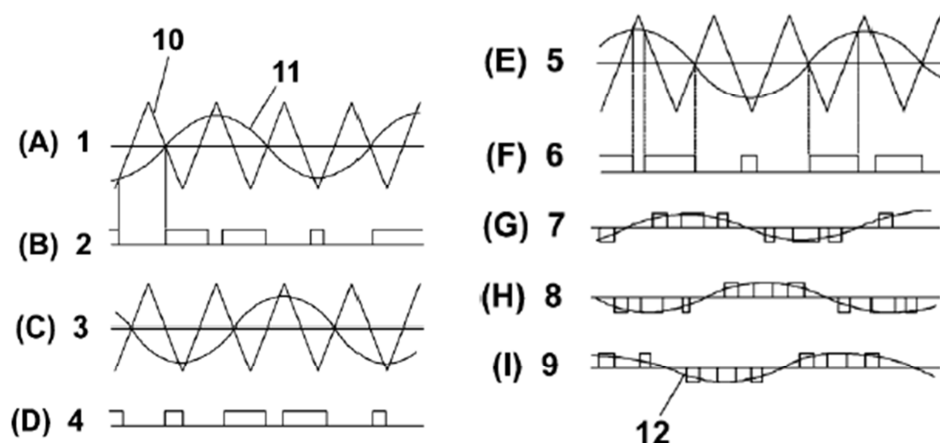
Fabricante do motor: Alstom

Potência nominal no eixo: 275 kW

Peso total do trem vazio: 336,7 toneladas

## ANEXO A - CONTROLE DA MODULAÇÃO

A Figura 27 e Tabela 10 ilustram as ondas triangulares e as ondas senoidais geradas pelo inversor. A indicação (A), (C) e (E) representam os resultados dos cálculos das ondas triangulares de modo de pulso e das ondas senoidais para cada uma das fases U, V e W.



**Figura 27 - Controle modulado de largura de pulso**

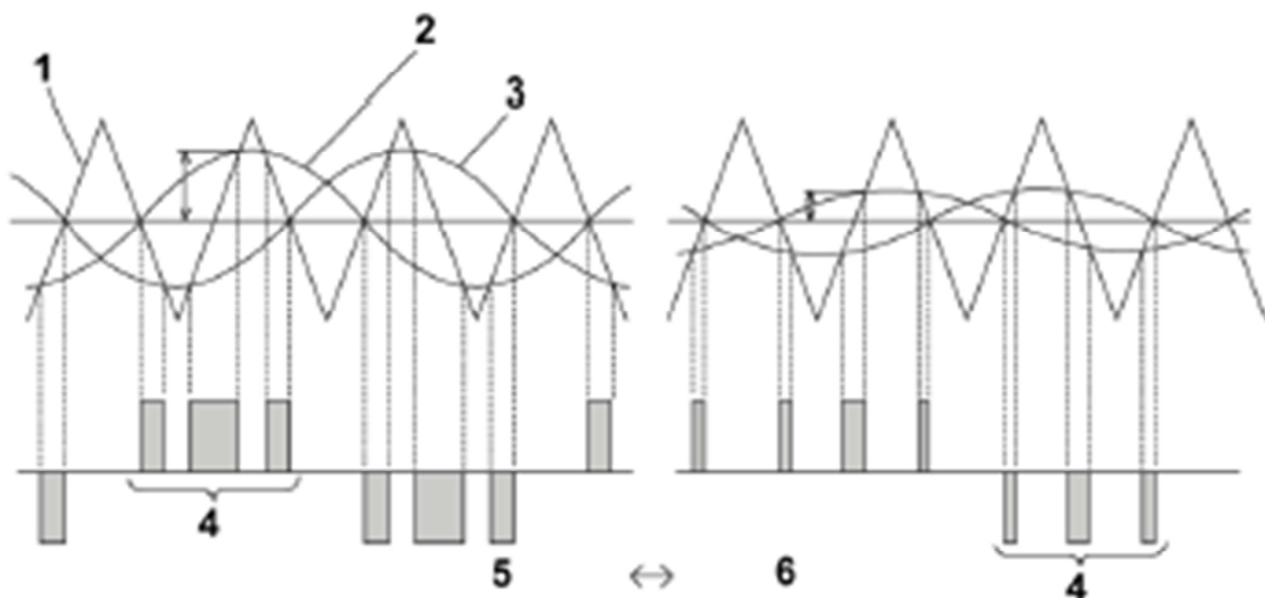
Fonte: (Manual série 8000, 2015)

**Tabela 10 - Legenda das formas de ondas e tensões de fases**

Posição	Item
1	Forma de onda de circuito de controle da fase U
2	Tensão da fase U - G (Fase de porta na fase U)
3	Forma de onda de circuito de controle da fase V
4	Tensão da fase V - G (Sinal de porta na fase V)
5	Forma de onda de circuito de controle da fase W
6	Tensão da fase W - G (Sinal de porta na fase W)
7	Tensão da fase U - V
8	Tensão da fase V - W
9	Tensão da fase W - U
10	Onda triangular (onda portadora)
11	Onda senoidal (onda de tensão de referência)
12	Componente de onda fundamental

O ponto de intersecção das ondas triangulares e senoidais fornecem o tempo de ligado/desligado do IGBT. As formas de ondas das tensões das fases U, V e W de formas de ondas são deslocadas em 120 graus. (B), (D) e (F) representam os sinais de porta de IGBT das fases U, V e W, respectivamente. (G), (H) e (I) representam formas de onda de tensão de linha para linha.

Quando a onda triangular é determinada pela frequência do inversor, o ponto de intersecção se altera com a variação da amplitude da onda senoidal. O fator de modulação variável controla a tensão de saída, conforme Figura 28 e Tabela 11.



**Figura 28 - Sistema de modulação de onda senoidal de largura de pulso**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

**Tabela 11 - Legenda da modulação de ondas e tensões de saídas**

Posição	Item
1	Onda transportadora triangular
2	Onda senoidal para modulação da fase U
3	Onda senoidal para modulação da fase V
4	Modo de pulsos
5	Tensão maior
6	Tensão menor

Para alterar a frequência de saída do inversor, é necessário modificar as ações de comutação do semiconductor através do controle do microcomputador do inversor.

Os IGBT's podem operar em um tempo de comutação máximo de 1000 Hz, devido à característica do IGBT que limita o tempo máximo permitido de ligado/desligado, sendo fator restritivo à medida que a frequência de comutação é aumentada.

A frequência de comutação é mantida dentro do limite de 800 Hz através da mudança dos modos de pulso.

## ANEXO B – MODOS DE PULSO

Uma onda senoidal pode ser sintetizada, através da quantidade de pulsos emitidos a cada meio ciclo, controlando-se o ligar/desligar da fonte de alimentação CC e a tensão média controlada pelo método PWM.

Há duas técnicas PWM utilizadas no controle do trem:

### **Modo de um pulso**

A função de controle do modo de um pulso consiste em uma onda senoidal de amplitude variável, de uma onda triangular de amplitude fixa e de frequência fixa ou variável, proporcional à velocidade ou à onda senoidal modulada.

Os ângulos para ligar e desligar os IGBT's são determinados pelo ponto de intersecção entre a onda senoidal modulada e a onda triangular, também chamada de onda portadora.

### **Modo Assíncrono**

No modo assíncrono, a frequência da onda triangular é fixa e apenas a frequência da onda senoidal modulada é modificada.

### **Fator de Modulação**

O valor do fator de modulação pode ser entre 0 e 1 ou de 0 % a 100 %, podendo ser considerado como um fator da tensão de saída máxima do inversor. Por exemplo: A tensão de saída máxima do inversor é de 2250 V, se o fator de modulação for 20 %, a tensão de saída do inversor será de 450 V.

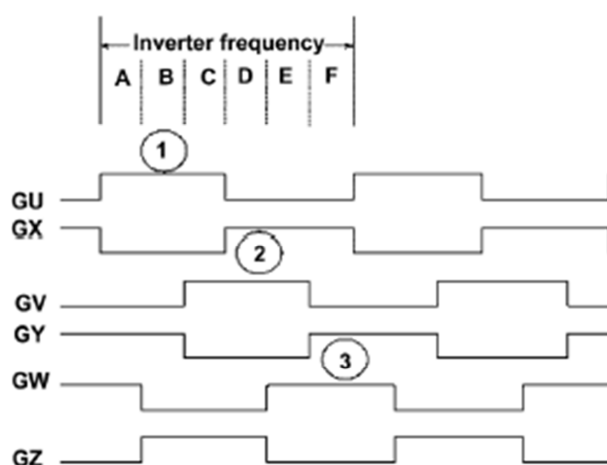
## ANEXO C – CONTROLE DE DIREÇÃO DO MOTOR DE TRAÇÃO (MODO 1 PULSO)

Os sinais de controle dos IGBT's do inversor são denominados de GU, GV, GW, GX, GY e GZ e o controle da sequência de comutação dos IGBT's modifica a direção de rotação do motor.

O motor pode ser usado para funcionamento em tração ou para regeneração através do aumento ou diminuição da frequência de escorregamento do motor de tração.

Durante o funcionamento no modo de um pulso, por exemplo, um período é dividido em seis seções (de A a F) e os IGBT's são ligados/desligados conforme Figura 29. Na rotação para frente, o campo magnético gira na direção:

fase U → ① fase V → ② fase W → ③



**Figura 29 - Sequência de controle ligado/desligado para os IGBT's (rotação para frente)**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

Se a configuração da sequência de comutação do IGBT for modificada para fase U → fase W → fase V através do microcomputador, a direção da rotação dos motores será invertida.

Assim, a simples modificação da configuração dos IGBT's em sequência pode alterar a sequência de controle de ligado/desligado da direção da rotação dos motores (rotação contrária).

## ANEXO D – OPERAÇÃO DO FREIO ELÉTRICO (MODO 1 PULSO)

Os sinais dos IGBT's GU, GV, GW, GX, GY e GZ são comandados pela polaridade do sinal de onda fundamental de tensão. Utilizando os sinais fundamentais de tensão trifásica Vu, Vv e Vw, os IGBT's são disparados sob as seguintes condições:

GU é ligado no intervalo  $V_u > 0$ ;

GX é ligado no intervalo  $V_u < 0$ ;

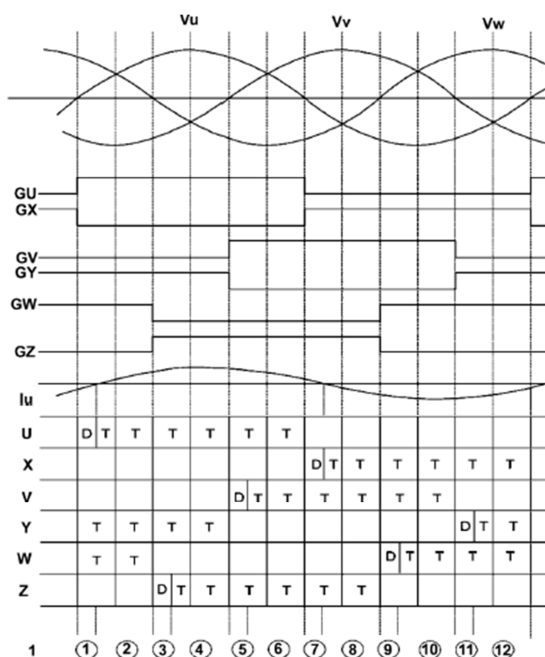
GV é ligado no intervalo  $V_v > 0$ ;

GY é ligado no intervalo  $V_v < 0$ ;

GW é ligado no intervalo  $V_w > 0$ ;

GZ é ligado no intervalo  $V_w < 0$ .

A Figura 30 representa os sinais de onda e a indicação de utilização para os diodos e tiristores condutores comandados pelos módulos Inteligentes de Energia IPM's em cada modo de regeneração.



**Figura 30 - Operação da frenagem no modo de 1 pulso**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

**Tabela 12 - Legenda da operação no modo de 1 pulso**

Posição	Item
1	12 modos de frenagem
D	Diodo condutor
T	Tiristor

Existem 12 modos de operação para propulsão, isto é, consomem energia na tração e outros 12 modos de operação para regeneração, isto é, devolvem energia na frenagem.

A diferença dos modos entre propulsão e regeneração se dá pela direção inversa da corrente do motor. Serão apresentados os doze modos de frenagem, demonstrando os IGBT's ligados e a rota das correntes de cada modo.

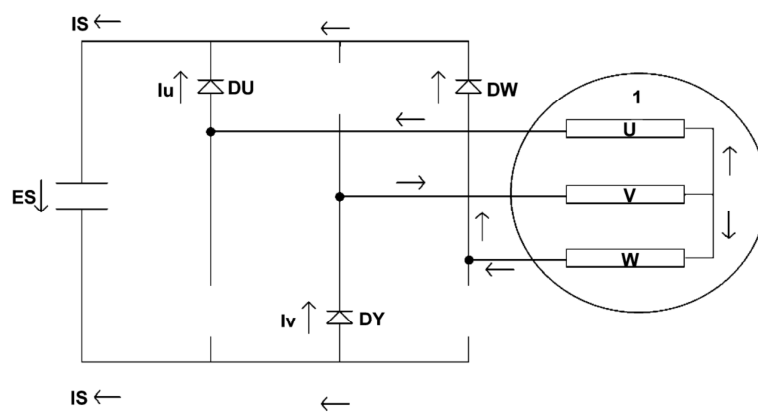
A Tabela 13 apresenta a legenda das correntes apresentadas nos 12 modos de frenagem.

**Tabela 13 - Legenda das siglas nos 12 modos de frenagem**

<b>Siglas</b>	<b>Descrição</b>
IS	Corrente do inversor
IM	Corrente do motor
Iu, Iv, Iw	Correntes nas fases U, V, W
L	Indutância do enrolamento do motor
GU, GV, GW, GX, GY, GZ	Diodos dos IGBT's
ES	Tensão do inversor
Eu, Ev, Ew, Ex, Ey, Ez	Tensões nos IGBT's
DU, DV, DW, DX, DY, DZ	Diodos dos IGBT's

### Modo de frenagem (1)

Os sinais de disparo do IGBT são enviados a GU, GY e GW. IS passa na rota IM(Eu)→ DU→ ES→ DY→ IM(Ev) e na rota IM(Ew)→ DW→ ES→ DY→ IM(DW). Assim, a soma de Iu (DU) e Iw(DW) constitui Iv(DY), representados na Figura 31.



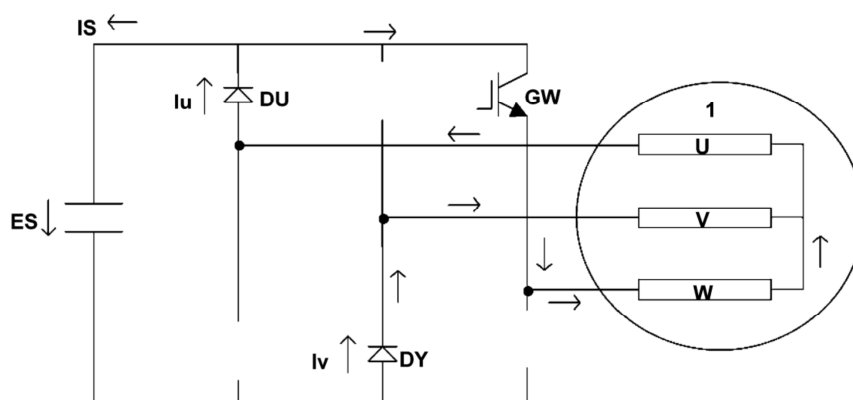
**Figura 31 - Modo de frenagem (1)**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)



### Modo de frenagem (2)

Os sinais de disparo do IGBT são enviados a GU, GY e GW. IS passa na rota IM(Eu)→ DU→ ES→ DY→ IM(Ev). Iw passa na rota DU→ GW→ IM(Ew)→ IM(Eu)→ DU, baseado nas polaridades da corrente Iu e da tensão Vu trifásica. Assim, GU e GY não são ligados e Iw é colocado em curto-circuito com L de IM, conforme representados na Figura 32.

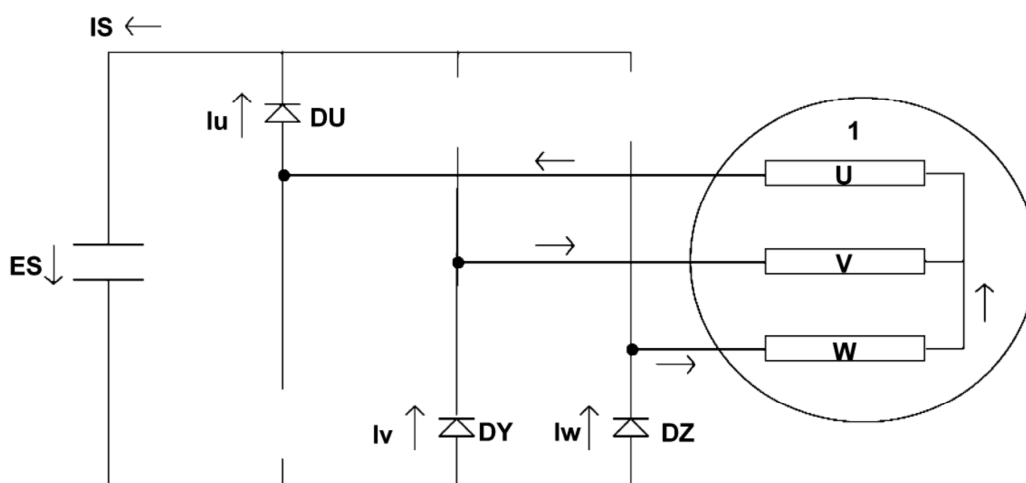


**Figura 32 - Modo de frenagem (2)**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

### Modo de frenagem (3)

Os sinais de disparo do IGBT são enviados a GU, GY e GZ. IS passa na rota IM(Eu)→ DU→ ES→ DY→ IM(Ev) e também na rota IM(Eu)→ DU→ ES→ DZ→ IM(Ez). Ou seja, a corrente Iu(DU) é dividida em Iv(DY) e Iw(DZ). Assim, GU, GY e GZ não são ligados, conforme representados na Figura 33.

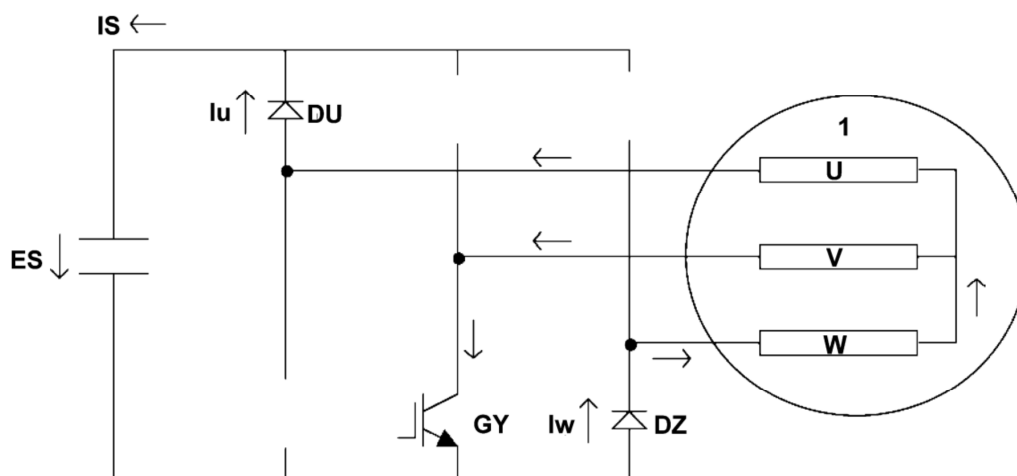


**Figura 33 - Modo de frenagem (3)**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

#### Modo de frenagem (4)

Os sinais de disparo do IGBT são enviados a GU, GY e GZ. IS passa na rota IM(Eu) → DU → ES → DZ → IM(Ew). Iv passa na rota IM(Ev) → GY → DZ → IM(Ew), baseado nas polaridades da corrente Iv e da tensão Vv trifásica. Assim, GU e GZ não são ligados e Iv é colocado em curto-circuito com L de IM, conforme representados na Figura 34.

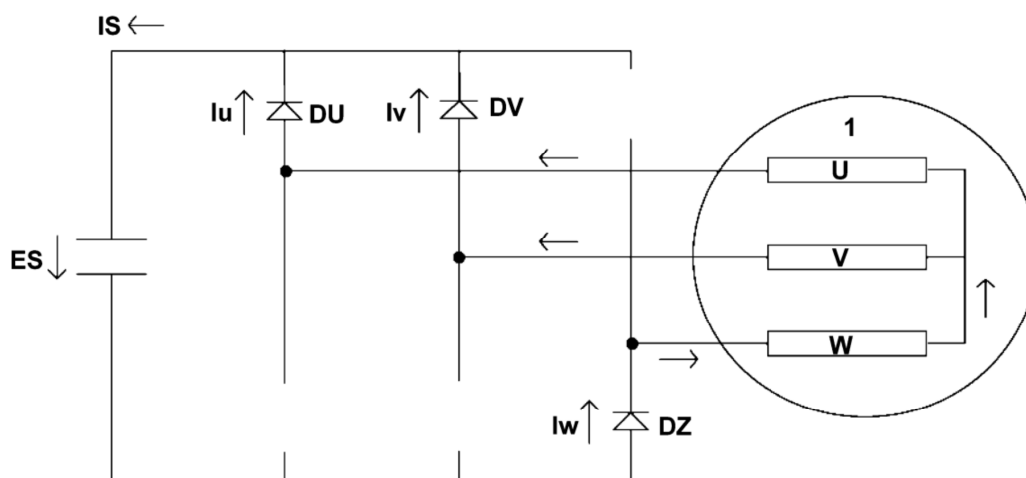


**Figura 34 - Modo de frenagem (4)**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

#### Modo de frenagem (5)

Os sinais de disparo do IGBT são enviados a GU, GV e GW. IS passa na rota IM(Eu) → DU → ES → DZ → IM(Ew). e na rota IM(Ev) → DV → ES → DZ → IM(Ew). Assim, a soma de Iu (DU) e Iv (DV) constitui Iw (DZ), conforme representados na Figura 35.

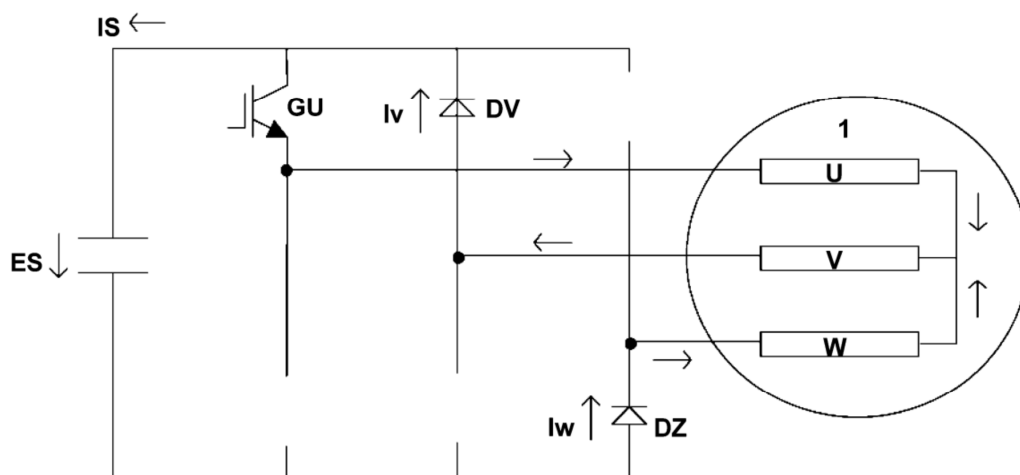


**Figura 35 - Modo de frenagem (5)**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

### Modo de frenagem (6)

Os sinais de disparo do IGBT são enviados a GU, GV e GZ. IS passa na rota IM(Ev)→ DV→ ES→ DZ→ IM(Ew). Iu passa na rota DV→ GU→ IM(Eu)→ IM(Ev)→ DV, baseado nas polaridades da corrente Iv e da tensão Vv trifásica. Assim, GV e GZ não são ligados e Iu é colocado em curto-circuito com L de IM, conforme representados na Figura 36.

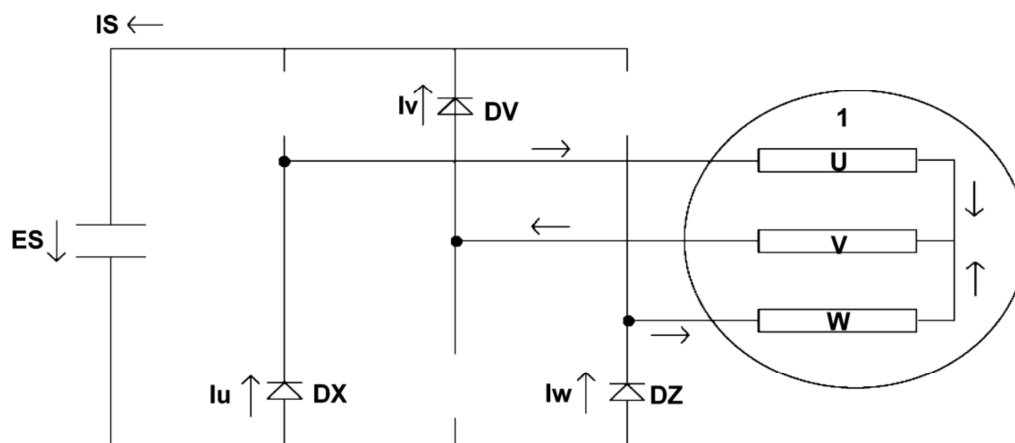


**Figura 36 - Modo de frenagem (6)**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

### Modo de frenagem (7)

Os sinais de disparo do IGBT são enviados a GX, GV e GZ. IS passa na rota IM(Ev)→ DV→ ES→ DX→ IM(Eu), e também na rota IM(Ev)→ DV→ ES→ DZ→ IM(Ew). Ou seja, a corrente Iv (DV) é dividida em Iu (DX) e Iw (DZ). Assim, GU, GY e GZ não são ligados, conforme representados na Figura 37.

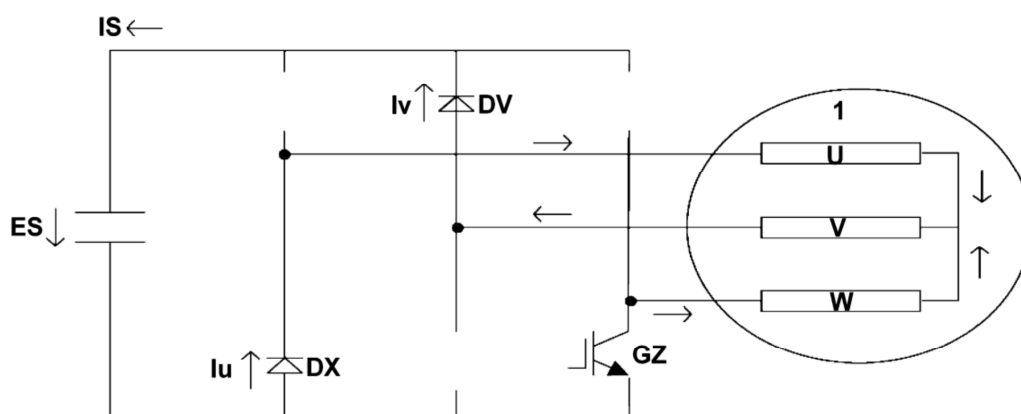


**Figura 37 - Modo de frenagem (7)**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

### Modo de frenagem (8)

Os sinais de disparo do IGBT são enviados a GX, GV e GZ. IS passa na rota IM(Ev)→ DV→ ES→ DX→ IM(Eu). Iw passa na rota IM(Ew)→ GZ→ DX→ IM(Eu), baseado nas polaridades da corrente Iu e da tensão Vu trifásica. Assim, GU e GZ não são ligados e Iw é colocado em curto-circuito com L de IM, conforme representados na Figura 38.

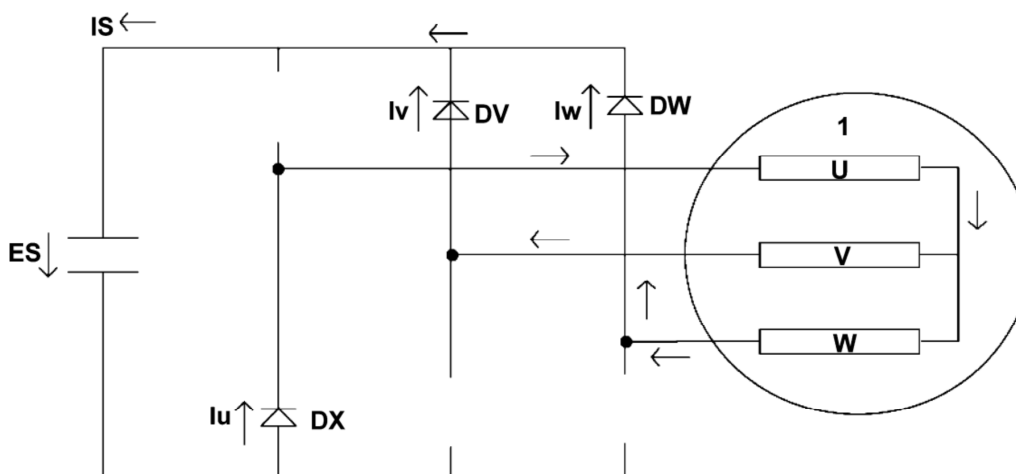


**Figura 38 - Modo de frenagem (8)**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

### Modo de frenagem (9)

Os sinais de disparo do IGBT são enviados a GX, GV e GW. IS passa na rota IM(Ev)→ DV→ ES→ DX→ IM(Eu), e na rota IM(Ew)→ DW→ ES→ DX→ IM(Eu). Assim, a soma de Iv (DV) e Iw (DW) constitui Iu (DX), conforme representados na Figura 39.

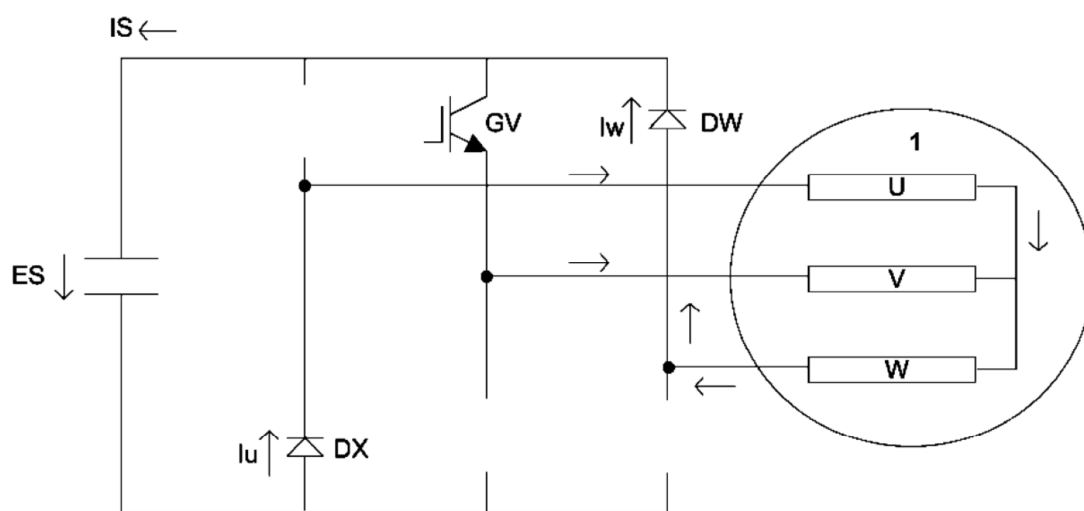


**Figura 39 - Modo de frenagem (9)**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

### Modo de frenagem (10)

Os sinais de disparo do IGBT são enviados a GX, GV e GW. IS passa na rota IM(Ew)→ DW→ ES→ DX→ IM(Eu). Iv passa na rota DW→ GV→ IM(Ev)→ IM(Eu)→ DW, baseado nas polaridades da corrente Iv e da tensão Vw trifásica. Assim, GV e GZ não são ligados e Iv é colocado em curto-circuito com L de IM, conforme representados na Figura 40.

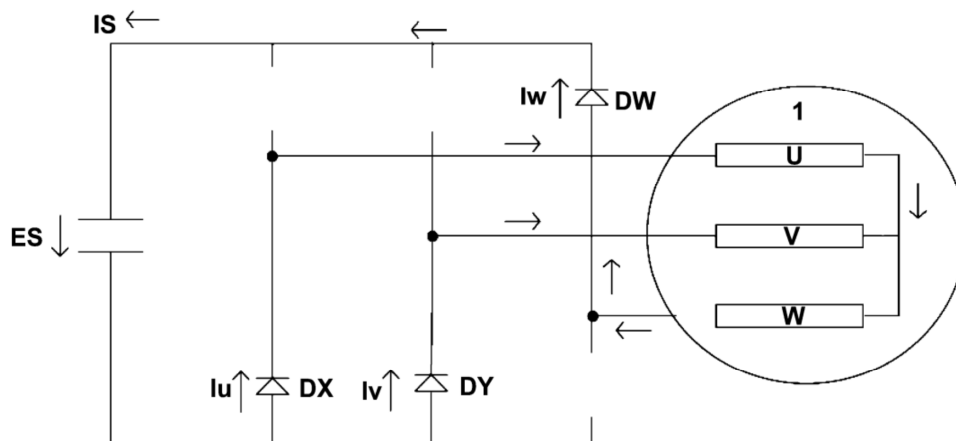


**Figura 40 - Modo de frenagem (10)**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

### Modo de frenagem (11)

Os sinais de disparo do IGBT são enviados a GX, GY e GW. IS passa na rota IM(Ew)→ DW→ ES→ DX→ IM(Eu), e na rota IM(Ew)→ DW→ ES→ DY→ IM(Ev). Assim, a soma de Iu (DX) e Iv (DY) constitui Iw (DW), conforme representados na Figura 41.

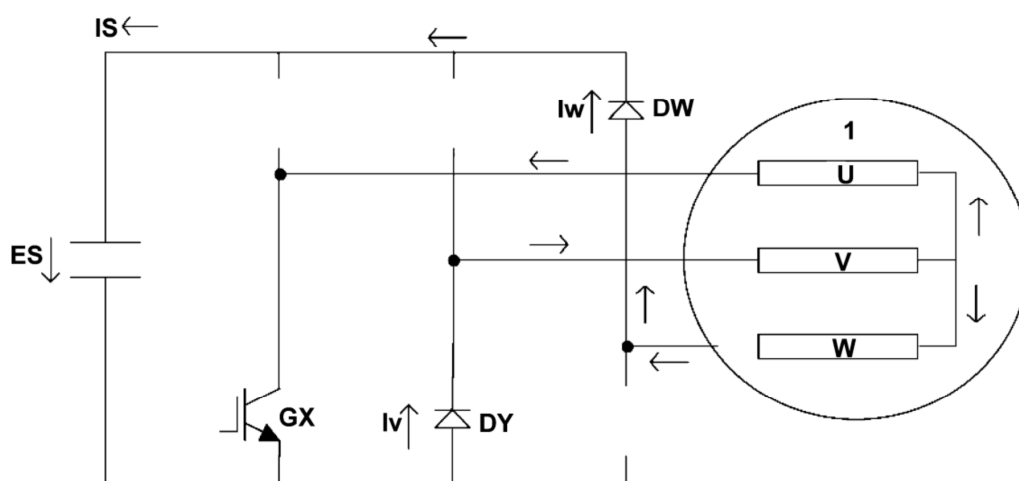


**Figura 41 - Modo de frenagem (11)**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

### Modo de frenagem (12)

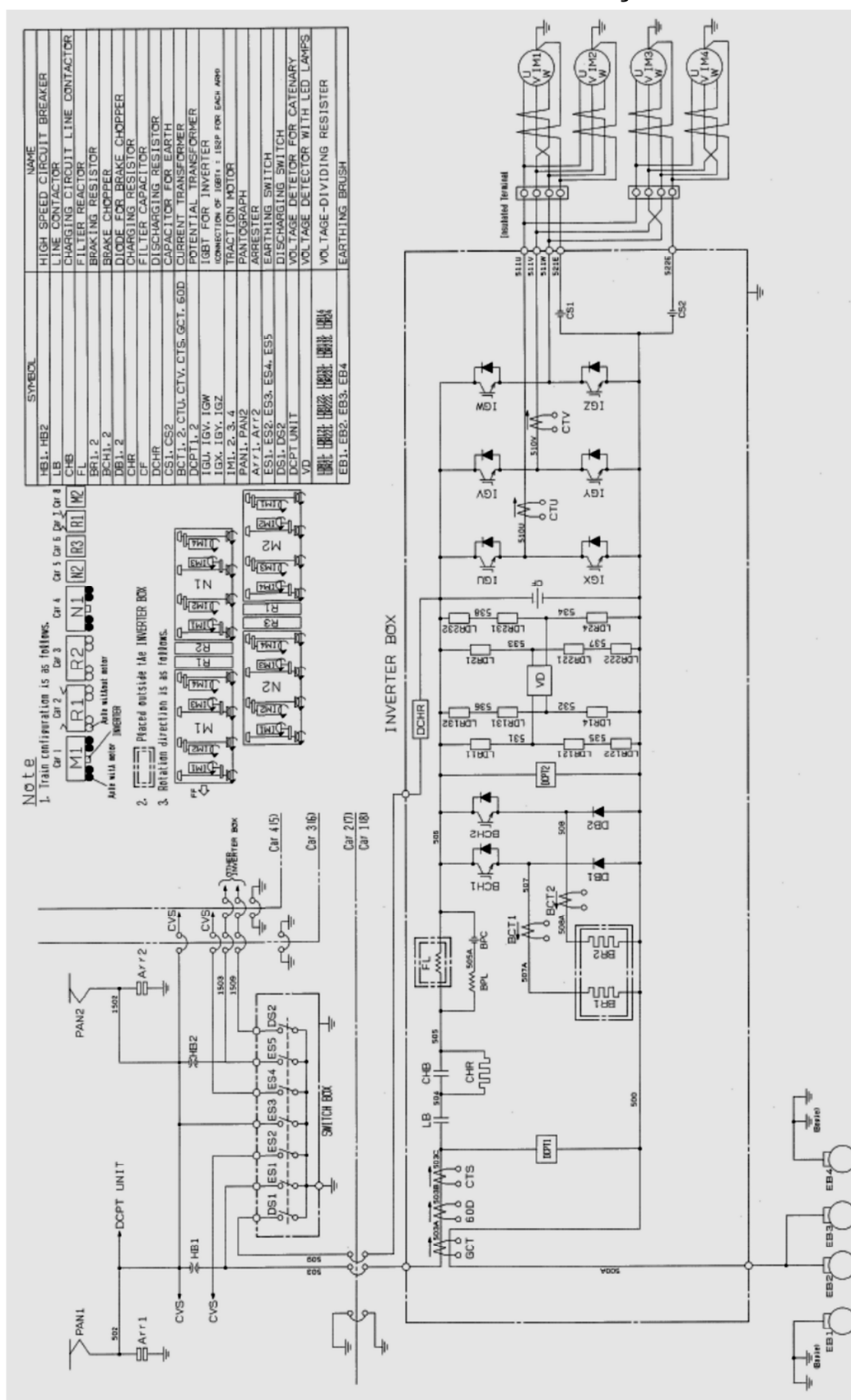
Os sinais de disparo do IGBT são enviados a GX, GY e GW. IS passa na rota IM(Ew)→ DW→ ES→ DY→ IM(Ev). Iu passa na rota IM(Eu)→ GX→ DY→ IM(Ev), baseado nas polaridades da corrente Iu e da tensão Vu trifásica. Assim, GU e GZ não são ligados e Iu é colocado em curto-circuito com L de IM, conforme representados na Figura 42.



**Figura 42 - Modo de frenagem (12)**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)

## ANEXO E – CIRCUITO DO INVERSOR DE TRAÇÃO SÉRIE 8000



**Figura 43 – Circuito do inversor de tração série 8000**

Fonte: (Manual série 8000, 2015)