

CARLOS ALBERTO DE SOUSA

Desenvolvimento de Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária – ACTREM: Melhoria da eficiência energética de sistemas de tração metroviária

São Paulo
2015

CARLOS ALBERTO DE SOUSA

Desenvolvimento de Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária – ACTREM: Melhoria da eficiência energética de sistemas de tração metroviária

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Luiz Pereira

São Paulo

2015

CARLOS ALBERTO DE SOUSA

Desenvolvimento de Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária – ACTREM: Melhoria da eficiência energética de sistemas de tração metroviária

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia de Automação

Orientador: Prof. Dr. Livre Docente Sergio Luiz Pereira

São Paulo

2015

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catlogação-na-publicação

Sousa, Carlos Alberto de

Desenvolvimento de Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária – ACTREM: Melhoria da eficiência energética de sistemas de tração metroviária / C. A. Sousa -- versão corr. -- São Paulo, 2015. 178 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Metrô 2.Energia elétrica (Regeneração) 3.Tração elétrica (Eficiência) 4.Subestações elétricas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

Dedico este trabalho a meus pais, cujos exemplos de vida me deram forças para alcançar as metas traçadas. Dedico, igualmente, a minha esposa e meus filhos, pelo apoio e inspiração.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sergio Luiz Pereira, que, desde o nosso primeiro encontro, apoiou minhas ideias sobre a realização deste trabalho e o conduziu ao seu término.

Aos amigos da CPTM e Metrô pela ajuda nos levantamentos dos dados.

Aos meus companheiros de trabalho na ViaQuatro, que me ajudaram na realização deste trabalho.

Aos meus pais, Raimundo e Maria Luiza, que me deixaram seguir o caminho que eu escolhi, e me apoiaram em minhas decisões.

Aos colaboradores anônimos, cujo esforço permitiu o alcance dos resultados.

A minha esposa Ana Karina e aos meus filhos Paola e Enzo, que me ajudaram a terminar mais esta fase de aprendizado.

Todo aquele que se dedica ao estudo da ciência chega a convencer-se de que nas leis do Universo se manifesta um Espírito sumamente superior ao do homem, e perante o qual nós, com os nossos poderes limitados, devemos humilhar-nos.

Albert Einstein

RESUMO

Esta tese propõe um modelo de regeneração de energia metroviária, baseado no controle de paradas e partidas do trem ao longo de sua viagem, com o aproveitamento da energia proveniente da frenagem regenerativa no sistema de tração.

O objetivo é otimizar o consumo de energia, promover maior eficiência, na perspectiva de uma gestão sustentável. Aplicando o Algoritmo Genético (GA) para obter a melhor configuração de tráfego dos trens, a pesquisa desenvolve e testa o Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária (ACTREM), usando a Linguagem de programação C++.

Para analisar o desempenho do algoritmo de controle ACTREM no aumento da eficiência energética, foram realizadas quinze simulações da aplicação do ACTREM na linha 4 - Amarela do metrô da cidade de São Paulo. Essas simulações demonstraram a eficiência do ACTREM para gerar, automaticamente, os diagramas horários otimizados para uma economia de energia nos sistemas metroviários, levando em consideração as restrições operacionais do sistema, como capacidade máxima de cada trem, tempo total de espera, tempo total de viagem e intervalo entre trens.

Os resultados mostram que o algoritmo proposto pode economizar 9,5% da energia e não provocar impactos relevantes na capacidade de transporte de passageiros do sistema. Ainda sugerem possíveis continuidades de estudos.

Palavras-Chave: Metrô. Eficiência energética. Otimização numérica. Subestação retificadora. Regeneração.

ABSTRACT

This thesis proposes a subway energy regeneration model, based on control stops and train departures throughout his trip, with the use of energy from the regenerative braking in the drive system.

The goal is to optimize the power consumption, improve efficiency, in view of sustainable management. Applying Genetic Algorithm (GA) to get the better of the trains traffic configuration, the research develops and tests the Traction Control Algorithm for Subway Energy Regeneration (ACTREM), using the C ++ programming language.

To analyze the performance of ACTREM control algorithm in enhancing energy efficiency, there were fifteen simulations of applying ACTREM on line 4 - Yellow subway in São Paulo. These simulations showed the ACTREM efficiency to generate automatically diagrams schedules optimized for energy savings in metro systems, taking into account the system's operational constraints such as maximum each train capacity, total wait time, total travel time and interval between trains.

The results show that the proposed algorithm can save 9.5% of the energy and not cause significant impacts on the transportation system capacity passengers. Also suggest possible continuities studies.

Keywords: Subway. Energy efficiency. Numerical optimization. Substation rectifier. Regeneration.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

1.	IMPORTÂNCIA DOS SISTEMAS METROVIÁRIOS – USO E GESTÃO PARA UM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	16
1.1.	AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA IMPLEMENTADAS EM SISTEMAS DE METRÔ.	20
1.2.	METODOLOGIA	22
1.3.	ORGANIZAÇÃO DA TESE	24
2.	TECNOLOGIAS EMPREGADAS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SISTEMAS METROVIÁRIOS.....	26
2.1.	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	27
2.1.1.	Armazenadores de energia a bordo do trem	28
2.1.2.	Sistemas estacionários de armazenamento de energia DC	31
2.2.	SUBESTAÇÕES INVERSORAS DE TRAÇÃO	33
2.3.	ALGORITMOS DE CONTROLE PARA OTIMIZAÇÃO DO DIAGRAMA HORARIO	36
3.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS E OPERACIONAIS DO SISTEMA DE TRAÇÃO DO METRÔ DA CIDADE DE SÃO PAULO	38
3.1.	SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA.....	40
3.2.	DESCRIÇÃO DAS SUBESTAÇÕES PRIMÁRIAS (SEP)	42
3.3.	DESCRIÇÃO DAS SUBESTAÇÕES AUXILIARES (SEA)	44
3.4.	DESCRIÇÃO DAS SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS (SER).....	46
3.4.1.	Automação da subestação retificadora (SER)	48
3.4.1.1.	Arquiteturas de hardware da automação e controle da SER	52
3.4.1.2.	Arquiteturas de software da automação e controle da SER.....	54
3.5.	SISTEMA DE TRAÇÃO METROVIÁRIA	55
3.5.1.	Motor de indução assíncrono na tração elétrica.....	56
3.5.1.1.	Sistema de acionamento dos motores	59
3.5.2.	Conjunto dos equipamentos de tração	62
3.5.2.1.	Sistema de tração do trem da linha 4 amarela.....	65
3.6.	SISTEMA DE SINALIZAÇÃO METROVIÁRIA – BLOCO MÓVEL.....	67
4.	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE ENERGIA DE TRAÇÃO METROVIÁRIA.....	75

4.1.	INTRODUÇÃO.....	75
4.2.	MODELO DE SIMULAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DE UMA LINHA METROVIÁRIA	77
4.3.	DADOS DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO.....	80
4.4.	MODELAGEM DINÂMICA DO MOVIMENTO DO TREM	81
4.4.1.	Massa efetiva do trem.....	82
4.4.2.	Aderência do trem.....	83
4.4.3.	Resistência ao movimento devido as características do trem - FRm	86
4.4.4.	Resistências ao movimento devido as características da via	88
4.4.4.1.	Resistências ao movimento devido de rampa - Fri	88
4.4.4.1.1.	Resistências devido à curvatura	90
4.4.4.2.	Aceleração instantânea do trem	92
4.4.5.	Estudo dos estados do trem	92
4.4.6.	Ciclos de tração do trem	94
4.4.7.	Modelagem de consumo de energia	98
4.5.	MODELAGEM DO TRÁFEGO DE TRENS	99
4.6.	MODELAGEM ELÉTRICA	103
4.7.	SIMULAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DA LINHA 4 – AMARELA DO METRÔ DE SÃO PAULO	108
4.7.1.	Dados do trem da linha 4 – Amarela	108
4.7.2.	Dados da topografia da via da linha 4 – Amarela.....	109
4.7.3.	Simulação da tração de um único trem	112
4.7.4.	Resultados da simulação de um trem	114
4.7.5.	Resultados da simulação do tráfego de trens	117
4.7.6.	Resultados da simulação elétrica	120
4.8.	MEDIÇÕES REALIZADAS NA LINHA 4 AMARELA DO METRÔ DE SÃO PAULO.....	120
4.8.1.	Procedimento de medição na linha 4 – Amarela.....	122
4.8.1.1.	Medições nas subestações retificadoras.....	123
4.8.1.2.	Medições na subestação retificadora de República	124
4.8.1.3.	Medidas de tensão e corrente no trem da linha 4	125
5.	ALGORITMO DE CONTROLE DE TRAÇÃO PARA REGENERAÇÃO DE ENERGIA METROVIÁRIA – ACTREM	129
5.1.	MODELAGEM MATEMÁTICA DO ALGORITMO DE CONTROLE - ACTREM.....	130
5.1.1.	Definição dos parâmetros do modelo	131
5.1.2.	Descrição do tráfego de trens.....	132
5.1.3.	Premissas adotadas para elaboração do modelo	135
5.1.4.	Restrições da função objetivo.....	136
5.1.5.	Função objetivo do controle de tráfego.	139
5.1.6.	Descrição do critério de avaliação da população	141

5.1.6.1.	Critério - o tempo de coincidência total entre os ciclos de aceleração e de frenagem dos trens	141
5.1.6.2.	Critério do tempo total de parada dos trens nas estações	144
5.2.	DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DE CONTROLE – ACTREM	146
5.2.1.	Macroetapa entrada e saída do algoritmo de controle ACTREM.....	149
5.2.2.	Macroetapa geração da população do algoritmo de controle ACTREM	150
5.2.2.1.	Estrutura do cromossomo do algoritmo de controle ACTREM.....	150
5.2.3.	Macroetapa avaliação da população do algoritmo de controle ACTREM	153
5.2.3.1.	Fator de fitness do algoritmo de controle ACTREM	155
5.2.4.	Macroetapa operadores genéticos do algoritmo de controle ACTREM	157
5.3.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	160
6.	CONCLUSÃO	161
	REFERÊNCIAS	167
	ANEXO A – MEDIÇÕES DO SISTEMA ELETRICO DA LINHA 4	172

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Aplicação do ESS de bordo em um trem do sistema metroviários.	29
Figura 2- Aplicação do ESS estacionário em um sistema de tração.	32
Figura 3: Configuração da subestação inversora de linha 4 do metrô da cidade de São Paulo	35
Figura 4: Diagrama de blocos do sistema elétrico do METRÔ-SP	39
Figura 5: Diagrama unifilar típico de uma SEP	43
Figura 6: Desenho da configuração típica de uma SEA	45
Figura 7: Diagrama elétrico de conexões de via simples de uma SER	47
Figura 8: Diagrama elétrico de conexões de via dupla de uma SER	47
Figura 9: Hierarquia de automação típica de um sistema de alimentação elétrico metrô-ferroviário...	48
Figura 10: Sistema típico de Automação de Subestação retificadora	50
Figura 11: Arquitetura de hardware e diagrama unifilar geral da subestação retificadora do sistema metroviário.....	53
Figura 12: Implementação do ambiente cliente/servidor	54
Figura 13: Proposta de integração dos dados.	55
Figura 14: Configuração típica dos trens do metrô de São Paulo.	56
Figura 15: Características de operação de um motor de indução operado por inversor de frequência60	
Figura 16: Figura Ilustrativa da disposição típica dos equipamentos de tração no truque.	62
Figura 17: Transmissão do movimento do sistema de tração metroviário	63
Figura 18: Esforços na roda de um trem.....	64
Figura 19: Característica do esforço em função da velocidade em tração e em frenagem.	66
Figura 20: Arquitetura de automação típica de um sistema de sinalização CBTC.....	68
Figura 21: Arquitetura Funcional Típica de um Sistema CBTC IEEE1474.....	69
Figura 22: Arquitetura de comunicação do Sistema CBTC da linha 4 amarela do metrô de São Paulo	71
Figura 23: Arquitetura de comunicação on-board do Sistema CBTC da linha 4 amarela.	73
Figura 24: Fluxograma da simulação do sistema de tração elétrica.....	79
Figura 25: Curva do coeficiente de aderência em função da velocidade	84
Figura 26: Forças exercidas em veículo em uma rampa.....	89
Figura 27: Gráfico da comparação entre o método de Desdouits e Meitzner	91
Figura 28: Ciclos de tração do trem	95
Figura 29: Redução de velocidade devido à redução do limite de velocidade permitido	97
Figura 30: Redução de velocidade devido a uma parada da estação.....	98
Figura 31: Trajetória do trem padrão da simulação	101
Figura 32: Diagrama horário dos trens da linha 4.....	102
Figura 33: Arranjo da localização física das estações e subestações em uma rede metroviária DC	103
Figura 34: Diagrama simplificado da rede elétrica metroviária em DC.....	104
Figura 35: Mascara do trem da linha 4 amarela do metrô de São Paulo	109
Figura 36: Característica da resistência normal da composição em função da velocidade	113
Figura 37: Aceleração desenvolvida pelo trem na via 1	114

Figura 38: Aceleração desenvolvida pelo trem na via 2	115
Figura 39: Velocidade desenvolvida pelo trem na via 1	115
Figura 40: Velocidade desenvolvida pelo trem na via 2	116
Figura 41: Consumo de energia do trem de uma viagem completa	116
Figura 42: Trajetória do trem padrão da simulação	117
Figura 43: Tempos de portas abertas, toque da campainha e liberação do trem.	117
Figura 50: Diagrama horário dos trens da linha 4.....	119
Figura 45: Setores elétricos da linha 4 amarela.....	121
Figura 46: Instalação dos equipamentos de medição nas subestações	123
Figura 47: Instalação dos equipamentos de medição no trem – tração	126
Figura 48: Instalação dos equipamentos de medição no trem – Sistemas auxiliares	127
Figura 49: Comparação do consumo simulado com o medido.....	128
Figura 50: Nomenclaturas das estações.....	132
Figura 51: Movimentação de chegada e partida de trens na condição 1.	133
Figura 52: Movimentação de chegada e partida de trens na condição 2.	134
Figura 53: Zona elétrica de distribuição de energia para sistemas metroviários.....	136
Figura 54: Sobreposição dos ciclos de aceleração e de frenagem	143
Figura 55: Fluxograma do algoritmo de controle ACTREM	148
Figura 56: Representação do gene.....	152
Figura 57: Geração do cromossomo.....	153
Figura 58: Tempos de paradas na estação - Otimizados	161
Figura 59: Comparação do consumo de energia.....	162

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Armazenadores capacitivos desenvolvido a bordo do trem	30
Tabela 2- Sistema de baterias desenvolvido a bordo do trem.....	30
Tabela 3- Armazenadores estacionários desenvolvidos para sistema de tração utilizando capacitores	32
Tabela 4: Armazenadores estacionários desenvolvidos para sistema de tração utilizando baterias...	33
Tabela 5: Subestações inversoras implementadas em sistemas de tração	34
Tabela 6: Modos de operação do sistema de metrô da cidade de São Paulo	38
Tabela 7: Níveis de tensão para os diversos sistemas de alimentação	42
Tabela 8: Especificação técnica do motor de tração	65
Tabela 9: Resultado do teste de carga do motor de tração	66
Tabela 10: Resultado do teste de carga do motor de tração	67
Tabela 11: Relação dos dados das características elétricas	80
Tabela 12: Relação dos dados do trem	80
Tabela 13: Relação dos dados da topografia da via.....	81
Tabela 14: Relação dos dados das condições operacionais.....	81
Tabela 15: Valores para o coeficiente λw	83
Tabela 16: Coeficientes A, B e C de Davis	87
Tabela 17: Características do trem da linha 4	108
Tabela 18: Posição das estações de passageiros.....	110
Tabela 19: Posição de início e o raio p das curvas da via 1.....	110
Tabela 20: Posições iniciais dos gradientes e a inclinação da via 1	111
Tabela 21: Posição de início e o raio p das curvas da via 2.....	111
Tabela 22: Posições iniciais dos gradientes e a inclinação da via 2	112
Tabela 23: Localização das subestações da linha 4	112
Tabela 24: Características operacionais da linha 4	118
Tabela 25: Energias geradas e consumidas na linha 4 - amarela.....	120
Tabela 26: Nomenclatura do AG.....	147
Tabela 27: Dados de entrada dos tempos de viagem entre estações.....	149
Tabela 28: Dados de saída do tempo de parada na estação	150
Tabela 29: Cromossomo com tempo de parada nas estações – Primeira Geração.....	154
Tabela 30: Cromossomo com tempo de parada nas estações e fator de fitness.....	156
Tabela 31: Descrição dos operadores genéticos utilizados.....	158
Tabela 32: Cromossomo com tempo de parada nas estações e fator de fitness e operadores genéticos - mutação (x).....	159
Tabela 33: Energias geradas e consumidas na linha 4 - amarela.....	160

LISTA DE SÍMBOLOS

Abreviação	Variável	Unidade
A	Coeficiente de atrito: rolamento puro da composição	[N/kN]
a_{max}	Aceleração máxima possível	m/s ²
a_t	Aceleração atual desenvolvida pelo trem	m/s ²
A_T	Área útil para transporte de passageiros em pé	m ²
B	Coeficiente de atrito viscoso	[N.h/kN.km]
b	Bitola da via	m
C	Coeficiente de atrito aerodinâmico	[N.h ² /kN.km ²]
CPT	Capacidade de um trem de transporte de passageiros	
d_n	Distâncias entre estações	m
E_t	Esforço de tração	KN
E_{Tmax}	Esforço de tração máximo	KN
f	Frequência do motor do trem	Hz
F_m	Esforço motor	KN
F_p	Força peso	KN
FR_c	Força despendida devido à curvatura da via	KN
FR_i	Força despendida devido à inclinação da via	KN
FR_m	Força de resistência que se opõe ao movimento do trem	KN
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
h	Intervalos entre os trens,	s
I_m	Corrente do motor	A
k	Indicação do número da parada do trem	
k_G	Relação de transmissão das engrenagens	
kt	Prefixo dos trens	
m	Massa total do trem	t
m_e	Massa do veículo por eixo	t
m_{et}	Massa efetiva do trem	t
m_t	Peso total do trem vazio	t
m_u	Peso total dos usuários do trem	t
N_{AC}	Quantidade de assentos disponíveis para os passageiros no trem	
n_e	Número total de eixos do trem	
NE	Número total de estações	
n_{em}	Número total de eixos motorizados do trem	
n_m	Numero de motores	
NPL	Capacidade de transporte de usuários de uma linha	
NT	Número total de trens	

NTH	Número de trens que passa por hora	
η_P	Número de polos do motor	
η_s	Velocidade de rotação síncrona	RPM
η_T	Eficiência da transmissão do trem	
P_m	Potência do motor de tração	W
r_r	Raio da roda do trem	m
S	Seção transversal do veículo	m ²
S_1	Posição atual do trem	m
S_2	Posição futura do trem	m
$ta1$	Tempo do início do ciclo de aceleração	s
$ta1_{in}$	Tempo do início da aceleração do trem "i" partindo da estação "n"	s
$ta2$	Tempo do final do ciclo de aceleração	s
$ta2_{in}$	Tempo final da aceleração do trem "i" após a partida da estação "n"	s
t_i	Tempo do início do ciclo inercial	s
$tf1$	Tempo do início do ciclo de frenagem	s
$tf1_{in}$	Tempo do início da frenagem do trem "i" chegando à estação "n";	s
$tf2$	Tempo do fim do ciclo de frenagem	s
$tf2_{in}$	Instante final da frenagem do trem "i" antes da chegada à estação "n",	s
t_{pa}	Tempo de portas abertas do trem	s
t_{pn}	Tempo de permanência exigido na estação n	s
T_r	Torque da roda	KNm
ts_a	Período de sobreposição de tempo na condição um	
ts_f	Período de sobreposição de tempo na condição dois	
t_{tc}	Tempo de toque da campainha para fechamento das portas	s
t_l	Tempo de reação dos equipamentos	s
t_{v_n}	Tempo de viagem entre as estações de n e n + 1	s
TX_{oc}	Taxa de ocupação de passageiros por metro quadrado	
t_1	Tempo atual	s
t_1	Tempo futura	s
V_m	Tensão do estator do motor	V
v_{max}	Velocidade máxima do trem	m/s
v_1	Velocidade atual do trem	m/s
v_2	Velocidade futura do trem	m/s
v_f	velocidade de frenagem.	m/s
v_r	velocidade de regime	m/s
v_t	Velocidade do trem	m/s
α	Ângulo de inclinação da via	°
Δt_a	Período de tempo de aceleração do trem	s

Δt_f	Período de tempo de frenagem do trem;	
λ	Coefficiente de inércia dos componentes rotativos	
ω_r	Velocidade angular do rotor do motor	rad/s
ω_s	Velocidade angular síncrona do motor do trem	rad/s
η_m	Rendimento do motor de tração	
μ	Coefficiente de aderência	

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ACTREM	Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária
APTA	American Public Transportation Association - Associação Americana de Transportes Públicos
ATO	Automatic train operation - Operação automática do trem
ATS	Automatic Train Supervision – Supervisão automática do trem
CBTC	Communication Based Train Control
CC	Carborne Controller
CCO	Centro de Controle Operacional
CIU	Communication Interface Unit
CLP	Controladores Lógicos Programáveis
CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
CRA	Carborne Radio Antenna
CRE	Carborne Radio Equipment
EDLCs	Electrical Double-Layer Capacitors
ESS	Energy Storage Systems
EUA	Estados Unidos da America
GPS	Global Position System
IED	Intelligent Electronic Device
IXL	Interlocking - Intertravamento do sistema de sinalização
LED	Light-Emitting Diode
MRT	Mass Rapid Transit
MTA	Metropolitan Transportation Authority
OBCU	On-Board Control Unit
PSD	Platform Screen Doors
SEA	Subestações Elétricas Auxiliares
SEP	Subestações Elétricas Primárias
SER	Subestações Elétricas Retificadoras
TAS	Transferência Automática de Setores
TIA	Transponder Interrogator Antenna de bordo
VLT	Veiculo leve sobre trilhos
VVVF	Variable Voltage Variable Frequency
WCC	Wayside Cell Controller
WCN	Wayside Communication Network
WER	Wayside radio equipment
WRD	Wayside Radio Antenna
ZC	Zona de Controle

1. IMPORTÂNCIA DOS SISTEMAS METROVIÁRIOS – USO E GESTÃO PARA UM DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O fenômeno de concentração de população em áreas urbanas vem se acentuando no século XXI, com tendência a crescer cada vez mais. Essa constatação é válida para o mundo todo. De acordo com a Organização das Nações Unidas (UNITED NATIONS, 2015), até 2030 a população urbana deverá chegar a quase cinco bilhões, cerca de 60% da população mundial.

Essa grande concentração torna necessária a implementação de meios de transporte de massa, como os sistemas metroviários de transporte de passageiros. Fatores como quantidade de pessoas transportadas e rapidez somam-se aos novos requisitos ecológicos de qualidade de vida, com menor nível de poluição do ar e poluição sonora, bem como ausência de engarrafamentos, favorecendo o incremento da solução metroviária. Segundo a APTA - American Public Transportation Association (APTA, 2009), o transporte público evita o uso de 4,2 bilhões de litros de gasolina por ano nos Estados Unidos. A APTA atribui a economia anual de cerca de 223 litros de gasolina por família, nos EUA, devido ao fácil acesso ao sistema de metrô nas grandes metrópoles do país.

A primeira solução metroviária foi a linha de metropolitano inaugurada em 1863 em Londres. A necessidade da construção desse novo sistema de transporte na cidade foi devido à grande população que, no século 19, passava de 6,5 milhões. Por volta de 1850, o trânsito de pedestres, cavalos e carroças já estava insuportável. Uma maneira de mudar este cenário era levar para o centro as linhas ferroviárias que passavam nos limites da cidade.

A ideia de fazer isso no nível do solo logo foi descartada, pois metade de Londres precisaria ser demolida se fossem colocados trilhos e estações na superfície. Algo pouco prático. Outra proposta, um tanto exótica para a época, era colocar os trens para circular em túneis debaixo da terra. Na falta de alternativa melhor, essa ideia emplacou. Mas precisou vencer resistências.

Apesar dessa e de outras dificuldades - como arrumar dinheiro para a obra faraônica - a construção começou em 1860 e a inauguração, três anos depois, foi um sucesso: 40 mil passageiros no primeiro dia.

Nos anos seguintes, outras cidades adotaram esta solução. Em 1896, Budapeste, na Hungria, abria o segundo metrô do planeta.

Em todo o mundo existem cerca de 140 redes de metrôs, que se distinguem entre si, devido às condições do terreno e às metas de cada projeto. Alguns desses sistemas estagnaram o crescimento logo após a inauguração, enquanto outros mantiveram um crescimento regular ao longo do tempo.

Atualmente, as maiores redes do mundo são a do metropolitano de Xangai, com cerca de 420 km de extensão, a do centenário metropolitano de Nova Iorque com 418 km de extensão (iniciada a operação em 1995), e a do mais antigo metrô do mundo, o metropolitano de Londres, com 408 km de extensão.

O Brasil também vive fenômeno semelhante. Embora, tradicionalmente no país, o transporte de passageiros seja feito principalmente por ônibus, os sistemas metroviários destacam-se como a solução preferencial para transporte de massa, especialmente nas grandes cidades. As maiores redes são o Metrô de São Paulo com 78,4 km, o Metrô do Rio de Janeiro com 48,1 km, o MetrôDF em Brasília com 45,5 km, o Metrô de Recife com 39,5 km, o Trensurb de Porto Alegre com 33,8 km e o MetrôBH de Belo Horizonte com 28,2 km.

Em São Paulo, o metrô está em operação desde 14 de setembro de 1974. É o maior e mais movimentado sistema de transporte metroviário do Brasil, com uma extensão de 78,4 quilômetros de ferrovias distribuídas em seis linhas. Há um total de 67 estações, sendo 61 operadas pela companhia do Metrô de São Paulo, quatro pela ViaQuatro e duas estações operadas em conjunto pelas duas companhias.

Sistemas de metrô prestam um considerável benefício para as comunidades, porém exigem grande quantidade de energia para funcionar. Devido a este fato, muitos operadores perceberam a necessidade de melhorar a gestão dos recursos do sistema de alimentação elétrica para aumentar o seu resultado final, além de proteger o meio ambiente. Nestes cenários dois pontos têm que ser analisados:

- a) A questão da eficiência energética do sistema metroviário;
- b) O impacto do sistema metroviário no meio ambiente.

Com relação à questão da eficiência energética, o primeiro passo é reaproveitar a energia de frenagem, operando com frotas mais modernas, capazes de consumir menos energia, minimizando, desta forma, os altos custos gerados pelo consumo de energia elétrica, principalmente aquela destinada à movimentação dos trens. Assim, um dos desafios das companhias operadoras de metrô no Brasil é diminuir os altos custos de consumo de energia, principalmente provindos da movimentação desses veículos.

Devido aos custos elevados da energia elétrica, a necessidade de eficiência energética tornou-se tema importante de pesquisa do Metrô de São Paulo, um dos sistemas mais superlotados do mundo, transportando diariamente 3 milhões de pessoas, com um consumo médio energético correspondente ao de mais de 3,5 milhões de consumidores residenciais (EPE, 2013), sendo que 76,3% da energia são consumidas pela operação de trens e 23,7% são consumidas pelos sistemas auxiliares, como iluminação das estações, escadas rolantes, ventilação entre outros.

Por este motivo, uma das principais tecnologias utilizadas pelo metrô de São Paulo, já em funcionamento nas novas frotas de trens, é a que transforma a energia gerada pela frenagem dos trens em energia elétrica, operação realizada por meio dos motores de tração. Essa energia pode ser devolvida à rede elétrica e reutilizada por outros trens ou em sistemas de ar condicionado, iluminação, entre outros equipamentos. Cabe colocar que, no caso dos trens mais antigos, como os da Linha 1 (Azul), é pouca sua eficiência na questão da frenagem, em que a energia é transformada em calor por meio do atrito. À medida que são reformados seus sistemas, eles são modernizados, permitindo uma geração de energia na frenagem.

Considerando a questão energética, o ponto principal não é a capacidade de o sistema transformar uma energia em outra. O que se faz necessário é que a rede esteja preparada para receber a energia regenerada. As tecnologias e estratégias mais propícias que possam maximizar a recuperação de energia proveniente da frenagem regenerativa dos trens são:

- a) Unidade Estacionária de Armazenamento de Energia: seu método de funcionamento é absorção da energia dos veículos em frenagem, armazenamento desta energia em supercapacitores para reaproveitamento nos veículos em aceleração;
- b) Sistemas de Regeneração de Energia DC: seu método de funcionamento é o aproveitamento da energia dos veículos em frenagem, convertendo-a para tensão alternada, utilizando um inversor de tração para reaproveitamento nos equipamentos ligados ao sistema de distribuição de energia em média tensão.
- c) Algoritmos de controle de otimização do tráfego de trens, que consiste no controle das partidas e paradas dos trens para que seja possível aproveitar o máximo da energia proveniente da frenagem regenerativa gerada pelo trem.

Com relação ao impacto no meio ambiente devido aos sistemas metroviários, os resultados do Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Metrô mostraram que o transporte metroviário emite, aproximadamente, 50 vezes menos gases de efeito estufa por passageiro transportado por quilômetro do que o equivalente transportado por automóveis, e 25 vezes menos que os ônibus.

Segundo relatório de sustentabilidade da Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô (METRÔ, 2011) são geradas 2 gramas de CO₂ (dióxido de carbono) para cada passageiro transportado por 1 km. Já os ônibus do transporte municipal de São Paulo, emitem, aproximadamente, 52 gramas em CO₂ por passageiro /quilômetro.

Com valores elevados de consumo de energia e com a preocupação com meio ambiente, as empresas do setor de transporte sobre trilhos continuamente procuram novos métodos para melhorar a eficiência energética. Para atingir este objetivo as empresas, entre diversas estratégias, também podem modificar a tecnologia ou implementar novos algoritmos de controle.

Atualmente, as principais ações em estudo para melhoria da eficiência energética do Metrô de São Paulo são:

- a) Instalação de sistemas de aproveitamento de energia das frenagens dos trens;

- b) Instalação de lâmpadas de alto rendimento;
- c) Troca do sistema de acionamento das escadas rolantes por sistemas mais eficientes.

A eficiência da energia elétrica usada durante a circulação de um trem na via pode ser significativamente melhorada se estratégias de controle para eficiência energética forem aplicadas.

A partir do quadro delineado, esse estudo explora o potencial da aplicação de estratégias de gerenciamento de energia utilizando algoritmos de controle. Na pesquisa são analisadas as potenciais economias de energia que podem ser obtidas com a implementação de um algoritmo de controle do tráfego de trens.

Neste sentido, esta tese de doutorado tem, como objetivo geral, apresentar uma proposta de um novo algoritmo de controle, denominado ACTREM – Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária, a ser aplicado em sistemas de tração metroviários. Os objetivos específicos da proposição desse algoritmo são:

- a) A diminuição do consumo de energia elétrica e das emissões de CO₂ por meio do aumento do aproveitamento da energia proveniente da frenagem dos trens;
- b) Dotar o sistema de maior eficiência energética pela distribuição ideal dos trens.

1.1. AÇÕES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA IMPLEMENTADAS EM SISTEMAS DE METRÔ.

Ações significativas estão sendo implementadas nos sistemas metroviários das cidades de Londres, Nova York e Cingapura. O seu conhecimento é eficaz para este estudo dado que as características desses sistemas são similares às do metrô da Cidade de São Paulo.

Iniciando a operação em 1863, o metrô de Londres, também conhecido como o Tube, é o sistema metroviário mais antigo do mundo. Atualmente, é o quarto maior do mundo, com 270 estações em 402 quilômetros de trilhos. Apesar da idade, é um sistema de metrô com várias ações de eficiência energética implementada. As principais são (UNDERGROUND, 2011):

- a) Escadas rolantes com sistema de acionamento automático, que são ativadas somente quando utilizadas;
- b) Aumento do uso de ventilação natural, com a finalidade de diminuir a necessidade de ar condicionado e
- c) Aumento do uso de luz natural, com a finalidade de reduzir a quantidade de luz artificial necessária para iluminar as estações.

O metrô da cidade de Nova York, com 418 quilômetros de extensão (NYC Transit), está entre os maiores sistemas metroviários do mundo, composto de 26 linhas, 468 estações e 6485 carros, sendo um dos metrôs mais movimentados do mundo, transportando 1,6 bilhão de passageiros por ano.

Devido ao consumo de energia para operação do sistema, o metrô de Nova York emite o equivalente a 2 milhões de toneladas de gases de efeito estufa a cada ano (MTA, 2012).

De acordo com o relatório do MTA - Metropolitan Transportation Authority (MTA, 2011), devido à existência do metrô de Nova York, diariamente cerca de 3 milhões de motoristas deixam de utilizar seus veículos.

Devido, porém, aos elevados custos da energia elétrica nos Estados Unidos da América (EUA), o metrô de Nova York iniciou várias ações para melhoria da eficiência energética. As principais são:

- a) Substituição das lâmpadas incandescentes sinais do trem para com sinais LED - Light-Emitting Diode, resultando em economia de energia de cerca de 6.000 MWh de eletricidade por ano;
- b) Substituição de 100.000 lâmpadas incandescentes no Grand Central Terminal, por lâmpadas fluorescentes compactas, economizando US \$ 100.000 por ano;

- c) Estudos sobre as possíveis tecnologias que podem ser aplicadas no aproveitamento da energia de frenagem dos trens.

O metrô de Nova York, devido a estas ações foi o primeiro sistemas metroviários da América do Norte a ter um prédio que conseguiu o certificado LEED¹;

O metrô de Cingapura conhecido como MRT - Mass Rapid Transit começou a operar em 1987, tornando-se o segundo mais antigo sistema metroviário no Sudeste Asiático. É também referência como um dos mais eficientes do mundo em termos energéticos, tendo conquistado o Prêmio MetroRail de eficiência energética em 2009 e 2010. MRT ganhou este prêmio, devido ao seu investimento em uma variedade de soluções de eficiência energética, incluindo (THONG & CHEONG, 2012):

- a) Portas de plataforma (**PSD - Platform Screen Doors**) **que separam a corpo da** Estações dos túneis, impedindo o ar de entrar no túnel da estação e reduzindo a quantidade de ar condicionado necessário para arrefecê-las;
- b) Escadas rolantes energeticamente eficientes - param quando não estão em uso, reduzindo o consumo de energia em 20%;
- c) Subestações Inversoras capazes de reaproveitar a energia regenerativa, proveniente da frenagem dos trens. Estudos iniciais estimam que esta recuperação possa gerar uma redução de 5% do total da energia utilizada no MRT.

1.2. METODOLOGIA

Como a aplicação de um método não empregado atualmente pelas empresas metroviárias brasileiras, a caracterização da pesquisa como estudo de caso foi descartada, devido a esta condição optou-se pela modelagem e simulação do problema de eficiência energética do sistema metroviário.

¹ LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) é um sistema internacional de certificação e orientação ambiental para edificações, utilizado em 143 países; possui o intuito de incentivar a transformação dos projetos, obra e operação das edificações, sempre com foco na sustentabilidade de suas atuações.

Do ponto de vista dos procedimentos de levantamento de dados, o estudo foi baseado na pesquisa bibliográfica, em testes e ensaios em campo.

A primeira etapa foi a realização da pesquisa bibliográfica com a finalidade de conhecer as contribuições científicas sobre os conceitos empregados nesta tese sobre simulação, visão sistêmica do sistema metroviário e aplicação de algoritmos genéticos em sistemas metroviários.

A segunda etapa foi o levantamento de dados e testes em campo. Nessa fase a linha quatro amarela do metrô da cidade de São Paulo foi escolhida como objeto de estudo, devido ao seu sistema de controle de tráfego de trens ser um dos mais modernos do mundo, o que facilita a implementação de um algoritmo de controle.

Para desenvolvimento do ACTREM foram realizadas as seguintes etapas:

- a) Levantamento das características da linha alvo de estudo;
- b) Pesquisa e análise dos principais algoritmos empregados no controle de energia em sistemas metroviários;
- c) Desenvolvimento matemático do algoritmo de controle intitulado ACTREM, para o aproveitamento da energia da frenagem dos trens;
- d) Testes e análises comparativas dos resultados obtidos com a simulação empregando o algoritmo ACTREM proposto.
- e) Análise dos resultados.

Para comprovação da eficiência da aplicação do ACTREM optou-se pelo desenvolvimento de um simulador do sistema de tração metroviário. Para o desenvolvimento do simulador foram realizadas as seguintes etapas:

- a) Modelagem dinâmica do movimento de um trem;
- b) Modelagem do tráfego de trens;
- c) Modelagem do sistema elétrico;

- d) Desenvolvimento do simulador empregado no desenvolvimento programação C++.

Para validação do simulador empregado na análise do ACTREM, foram realizadas medições nas subestações e trens da linha 4 – Amarela de São Paulo para levantamento dos dados de consumo, desempenho e operação do sistema em estudo.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE

A apresentação dessa tese consta de seis capítulos:

Capítulo 1: discorre sobre a importância dos sistemas metroviários, traçando um breve histórico e pontuando questões sobre seu uso e gestão para um desenvolvimento sustentável. Também apresenta o trabalho desta tese, definindo seus objetivos, metodologia e forma de estruturação.

Capítulo 2: apresenta a comparação das diferentes estratégias existentes atualmente para aumentar o aproveitamento da energia regenerada da frenagem dos trens, como o armazenamento de energia em baterias estacionárias ou em supercapacitores, a utilização de subestações inversoras recuperadoras de energia como forma de devolver o excedente de energia regenerada para a rede de distribuição e implementação de algoritmos de controle.

Capítulo 3: apresenta a arquitetura, equipamentos, incluindo a análise do sistema de distribuição de energia metroviária, o equipamento de tração dos trens e procedimentos operacionais e cálculo de parâmetros da linha metroviária em estudo.

Capítulo 4: apresenta as equações da física aplicadas a sistemas elétricos de potência em sistemas de tração metroviária. Juntamente com a modelagem do movimento do trem, um modelo de consumo de energia é desenvolvido. Um simulador para cálculo desses parâmetros é o resultado final deste capítulo; o simulador é utilizado como ferramenta básica para os estudos da aplicação do algoritmo proposto.

Capítulo 5: Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do ACTREM - Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária. É exposta a modelagem matemática para a aplicação do algoritmo genético. São descritos os resultados da simulação do algoritmo de controle ACTREM, destacando questões sobre a eficiência da regeneração de energia. É feita uma comparação entre os cenários de maior eficiência energética do consumo de energia.

Capítulo 6: Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre a aplicação do algoritmo de controle na conquista de uma eficiência energética.

2. TECNOLOGIAS EMPREGADAS PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SISTEMAS METROVIÁRIOS

Os avanços na tecnologia têm o potencial de melhorar a eficiência energética em quase todos os aspectos do sistema metroviário. Por exemplo, uma redução da massa do trem tem a possibilidade de reduzir, significativamente, o consumo de energia; o mesmo pode ocorrer com a alteração no design do trem com consequente melhora no desempenho aerodinâmico.

As novas tecnologias, contudo, demandam grandes investimentos para serem implantadas nos sistemas metroviários existentes. Entretanto, mudanças nos algoritmos de controle, tais como o controle das partidas e paradas dos trens para aproveitar o máximo da energia de frenagem regenerativa gerada, apresentam vantagens: são rápidas para as respectivas implementações, demandam menos investimentos e promovem pouca alteração no hardware do sistema.

A maioria dos sistemas metroviários é equipada com tecnologia de frenagem regenerativa. Nesses sistemas, a energia recuperada é usada principalmente para fornecer energia para as funções auxiliares do próprio trem, enquanto que o excesso é devolvido para a linha de distribuição a fim de alimentar outros trens da rede. No entanto, como a demanda de energia dos sistemas auxiliares do trem é relativamente menor e a frenagem e aceleração simultânea de diferentes trens na mesma seção elétrica é pouco provável de ocorrer, uma quantidade significativa da energia de frenagem é dissipada em resistores. Note que os sistemas metroviários brasileiros são alimentados por redes de corrente contínua (DC), que são menos receptivas do que as redes alternadas (AC), e, portanto, nem sempre é possível absorver a energia regenerada da frenagem dos trens.

As novas tecnologias em início de aplicação em sistemas de transporte sobre trilho são três:

- a) Unidade Estacionária de Armazenamento de Energia: seu método de funcionamento é absorção da energia dos veículos em frenagem,

armazenamento desta energia em capacitores para reaproveitamento nos veículos em aceleração;

- b) Sistemas de Regeneração de Energia DC: seu método de funcionamento é o aproveitamento da energia dos veículos em frenagem, convertendo-a para tensão alternada, utilizando um inversor de tração para seu reaproveitamento nos equipamentos ligados no sistema de distribuição de energia em média tensão.
- c) Algoritmos de controle: algoritmo para otimizar o diagrama horário de partidas e paradas dos trens de modo que aumente o tempo coincidente dos período de aceleração e de frenagem dos trens, deste modo aumentando o aproveitamento da energia proveniente das frenagens dos trens.

2.1. SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Os avanços da eletrônica de potência e das tecnologias de armazenamento de energia permitiram que sistemas de armazenadores capacitivos se tornassem uma opção muito promissora para aproveitar a energia proveniente da frenagem regenerativa dos trens no transporte metroviário. Os armazenadores de energia (ESS - Energy Storage Systems) podem ser instalados a bordo dos trens ou em pontos específicos ao longo da linha metroviária.

A primeira opção permite que os trens armazenem, temporariamente, a sua própria energia de frenagem para reutilizá-la na aceleração subsequente. A segunda opção permite acumular energia a partir da frenagem de qualquer trem nas proximidades para reutilizá-la no sistema. A seleção das tecnologias de armazenamento de energia depende das necessidades particulares de cada caso, mas, nas aplicações em sistemas metroviários exigirá atender às seguintes características:

- a) Grande número de ciclos de carga e descarga;
- b) Alta capacidade de dissipar potência;

- c) Alta capacidade de armazenamento de energia;
- d) Peso e volume reduzidos, especialmente para sistemas a bordo dos trens.

Atualmente, as principais tecnologias que satisfazem estes requisitos são os capacitores de dupla camada elétrica EDLCs - Electrical Double-Layer Capacitors, conhecidos como supercapacitores, e as baterias de Li-ion e NiMH (VAZQUEZ, et al., 2010).

Os sistemas de armazenadores de energia têm um alto potencial de seu reaproveitamento em transporte metroviário. Assim, em linha com intervalos entre trens superiores a 4 minutos, o consumo de energia de tração pode ser reduzido em cerca de 15% a 35%, de acordo com os estudos de:

- a) Barrero - da linha 25 do VLT de Bruxelas, simulado com o veículo T3000 Bombardier Flexity, com um intervalo mínimo entre trens de 6 minutos, obteve-se uma economia de 19 a 21,5% de consumo de energia (BARRERO, et al., 2010);
- b) Domínguez - das linhas de Metrô de Madrid que possuem o sistema de controle ATO, com intervalo entre trens de 3,5 a 15 minutos, atingiu-se 13% de economia de energia (DOMÍNGUEZ, et al., 2011);
- c) Chymera - no VLT da Blackpool Tramway na Inglaterra, com intervalos entre trens de 12 minutos, foi obtida uma economia de 30,6% na energia consumida (CHYMER, et al., 2008).

2.1.1. Armazenadores de energia a bordo do trem

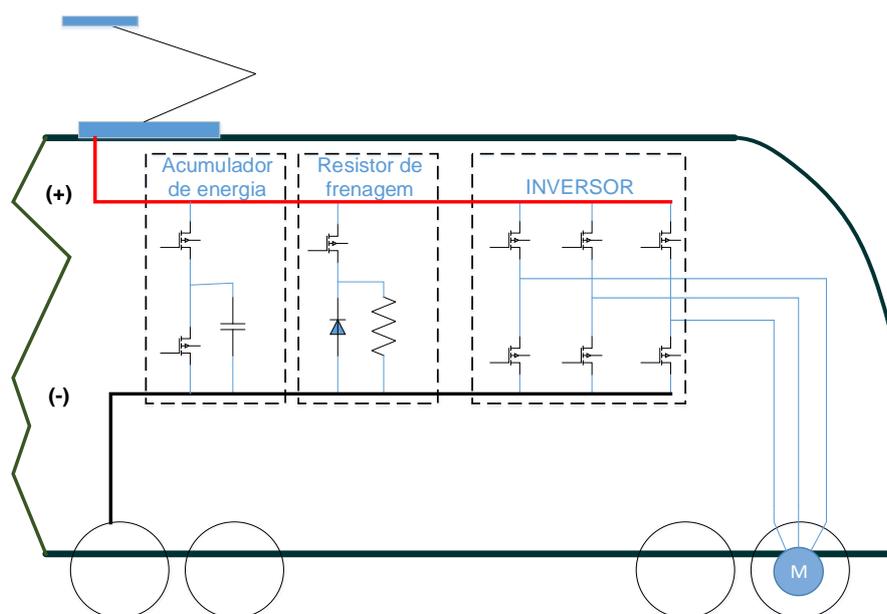
O ESS a bordo do trem ajuda a minimizar os picos de potência durante a aceleração dos trens, o que resulta em redução dos custos de energia e menos perdas resistivas na linha de distribuição (GONZALEZ-GIL, et al., 2014). O ESS pode ser projetado para ajudar a estabilizar a tensão da rede (CICCARELLI, et al., 2012) ou, ainda, para fornecer certo grau de autonomia para os serviços sem catenária, por

exemplo, em linhas que percorrem centros históricos (ALLÈGRE, et al., 2010). Quando comparado com os sistemas estacionários, o ESS a bordo do trem apresenta uma maior eficiência devido à ausência das perdas provenientes da linha.

A gestão da energia recuperada é mais simples, devido ao fato de o controle ser independente das condições de tráfego. No entanto, os dispositivos móveis de armazenamento, geralmente, exigem grandes espaços no veículo e apresentam um aumento considerável de peso. Por estas razões, a instalação do ESS a bordo do trem é recomendado para projetos totalmente novos e não para a adaptação das frotas em uso.

A figura 1 ilustra a aplicação do ESS de bordo em um trem do sistema metroviário.

Figura 1: Aplicação do ESS de bordo em um trem do sistema metroviários.



Fonte: Autor

Atualmente, no Brasil, não existem projetos para aplicação desta tecnologia. Os principais motivos para a ausência de projeto de implementação do ESS's de bordo são:

- a) Um custo maior de projeto do trem para manter a mesma quantidade de usuários transportados e de manutenção da via, devido ao acréscimo de peso no trem para instalação do ESS de bordo;

- b) Menor vida útil do ESS em linhas com as características do metrô de São Paulo, onde o sistema opera com curtos intervalos de aceleração e frenagem;
- c) Em condições de sobretensões aumenta a probabilidade explosões dos supercapacitores, isto acarreta o aumento do risco de acidentes com usuários.

A tabela 1 mostra os principais sistemas a bordo do trem desenvolvido utilizando armazenadores capacitivos.

Tabela 1- Armazenadores capacitivos desenvolvido a bordo do trem

Desenvolvedor	Potência (kW)	Capacidade de armazenamento de energia (kWh)	Local de desenvolvimento
Bombardier	300	1	VLT da cidade de Mannheim na Alemanha em serviço entre 2003 e 2007.
Siemens	288	0,85	VLT da cidade de Innsbruck na Áustria.
CAF	N/I	0,8	VLT da cidade de Sevilha, Saragossa e Granada na Espanha atualmente em serviço.
Alstom	N/I	0,8	Protótipo testado no VLT de Rotterdam na Holanda no período de 2004 a 2005

Fonte: (GONZALEZ-GIL, et al., 2014)

A tabela 2 mostra os principais sistemas a bordo do trem desenvolvido utilizando baterias

Tabela 2- Sistema de baterias desenvolvido a bordo do trem

Desenvolvedor	Potência (kW)	Capacidade de armazenamento de energia (kWh)	Local de desenvolvimento
Kawasaki	250	120	Protótipo em teste no sistema de transporte da cidade de Sapporo no Japão no período de 2007 a 2008
Kinki Shayro	N/I	40	Protótipo em testes na cidade de Charlotte, Carolina do Norte, EUA.

Fonte: (GONZALEZ-GIL, et al., 2014)

A maioria dos sistemas de acumuladores de energia que empregam a tecnologia dos supercapacitores está sendo implementada em sistemas de VLT; isto se deve às características dos supercapacitores de rápida carga e descarga, ou seja, elevada capacidade de armazenamento de energia em intervalos curtos de tempo e um baixo custo de implementação, em comparação com os demais sistemas. No entanto, a baixa capacidade de fornecimento de energia durante períodos maiores

de tempo dificulta a utilização de supercapacitores em sistemas projetados para fornecer um grau de autonomia para movimentação dos trens. Nestes casos, as baterias de alta potência, como Li-ion ou NiMH são melhores opções, devido a sua característica de armazenar grandes quantidades de energia; porém, para isto é necessário um período de tempo maior de carga.

2.1.2. Sistemas estacionários de armazenamento de energia DC

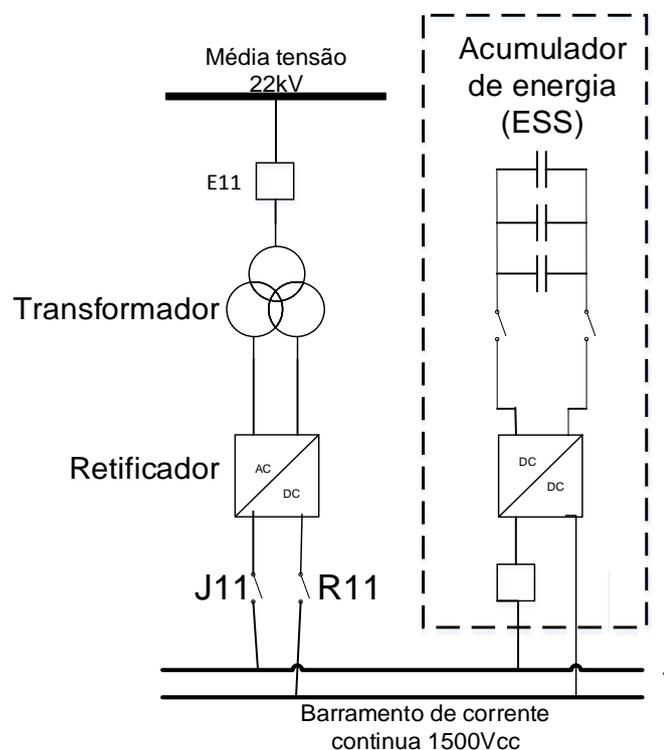
O sistema de armazenadores de energia estacionária em sistemas de tração tem como características:

- a) Armazenamento da energia proveniente das frenagens dos trens que não puderam ser consumidas instantaneamente, para posterior reaproveitamento;
- b) Estabilização da tensão da rede, o que representa uma vantagem importante sobre os inversores para regeneração de energia (GONZALEZ-GIL, et al., 2014);
- c) Limitação dos picos de energia durante acelerações dos trens;
- d) Oferta de um certo grau de autonomia para os trens poderem chegar à estação mais próxima, em caso de falha de alimentação elétrica.

Em comparação com os dispositivos instalados a bordo dos trens, restrições de instalação como espaço e peso não são um grande problema em instalações na via. A manutenção dos sistemas ESS estacionários não afeta a oferta de trens. Por outro lado, o ESS estacionário envolve perdas de transmissão mais elevadas na linha, o que exige um estudo cuidadoso para determinar a posição ideal dos dispositivos de armazenamento na rede (GONZALEZ-GIL, et al., 2014). A gama de tecnologias de armazenamento de energia para sistemas estacionários é maior do que para os dispositivos a bordo do trem.

A figura 2 ilustra a aplicação do ESS estacionário em um sistema de tração.

Figura 2- Aplicação do ESS estacionário em um sistema de tração.



Fonte: (Autor)

A tabela 3 mostra os principais sistemas estacionários com o uso de capacitores desenvolvido para o sistema de tração.

Tabela 3- Armazenadores estacionários desenvolvidos para sistema de tração utilizando capacitores

Desenvolvedor	Potência (kW)	Capacidade de armazenamento de energia (kWh)	Local de desenvolvimento
Siemens	700	2,5	VLT das cidades de Madri e Cologne na Espanha colocado em serviço em 2003 VLT da Rail Transit na cidade de Toronto no Canadá colocado em serviço em 2001
Bombardier	650	1	N/I
Adeneo (Adetel)	1000	4	Projeto piloto no VLT da cidade de Lion na França iniciado em 2011
Envirtech Energy (ABB)	4500	16,5	Projeto piloto para ser implementado no Metro da Filadélfia iniciado em 2012

Fonte: (GONZALEZ-GIL, et al., 2014)

A tabela 4 mostra os principais sistemas acumuladores de energia estacionários com o uso de baterias desenvolvidos para sistema de tração.

Tabela 4: Armazenadores estacionários desenvolvidos para sistema de tração utilizando baterias

Desenvolvedor	Potência (kW)	Capacidade de armazenamento de energia (kWh)	Local de desenvolvimento
Kawasaki	N/I	400	Projeto piloto no metrô da cidade de Nova York iniciado em 2010 No metrô da cidade de Osaka iniciados os testes 2007
Hitachi	2000	N/I	Projeto piloto no VLT da cidade de Kobe colocado em operação em 2007. Projeto em fase de implementação no metrô da cidade de Macau.
Saft	1500	400	Projeto piloto no VLT da Filadélfia iniciado em 2012.

Fonte: (GONZALEZ-GIL, et al., 2014)

Atualmente, no Brasil, não existem projetos para aplicação desta tecnologia. O principal motivo para a ausência de tais projetos é a menor vida útil do ESS em linhas com as características do metrô de São Paulo, onde o sistema opera com curtos intervalos de aceleração e frenagem.

2.2. SUBESTAÇÕES INVERSORAS DE TRAÇÃO

Subestações inversoras para regeneração de energia proveniente da frenagem dos trens incluem conversores que permitem um fluxo bidirecional de energia em redes de corrente contínua. Isto implica que toda a energia regenerada que não é consumida pelos trens no sistema pode ser conduzida de volta à rede de distribuição de energia AC, para ser consumidas por outros equipamentos como elevadores, escada rolantes, iluminação das estações entre outros. Desta maneira, a energia pode ser usada nas escadas rolantes, sistemas de iluminação, sistema de ventilação etc., ou também pode ser reaproveitada na rede de tração.

Subestações inversoras são concebidas, principalmente, para maximizar a utilização da energia de frenagem, retornando o excedente para a rede elétrica de corrente

alternada (AC). Os projetos de subestações inversoras devem prever condições para minimizar o nível de harmônicas, a fim de garantir uma boa qualidade da energia que retorna para a rede AC.

Vários estudos têm demonstrado que esta tecnologia pode economizar entre 7 e 14% em sistemas ferroviários urbanos (GONZALEZ-GIL, et al., 2014). As perdas de transformação nas subestações inversoras são menores que as perdas de transformação no ESS, embora as perdas resistivas em linha possam ser grandes, dependendo da localização da subestação (MELLITT, et al., 1984).

As utilizações de subestações inversoras possibilitam a recuperação de energia proveniente da frenagem em qualquer momento, devido ao fato de as linhas de corrente alternada serem, permanentemente, receptivas. No entanto, as subestações inversoras não permitem o funcionamento livre de catenária ou terceiro trilho e não podem ser utilizadas para a estabilização da tensão ou redução do pico de potência.

Um das principais barreiras para o uso de subestações inversoras no sistema metroviário são os seus custos elevados de investimento. Dado o seu potencial para reduzir o consumo total de energia no transporte metroviário, fabricantes de sistemas metroviários vêm investindo no desenvolvimento de subestações inversoras confiáveis nos últimos anos. Como mostrado na Tabela 4, existem, atualmente, quatro diferentes sistemas disponíveis no mercado, embora a sua aplicação prática esteja restrita, até agora, a sistemas onde o intervalo entre trens seja acima de 4 minutos.

Tabela 5: Subestações inversoras implementadas em sistemas de tração

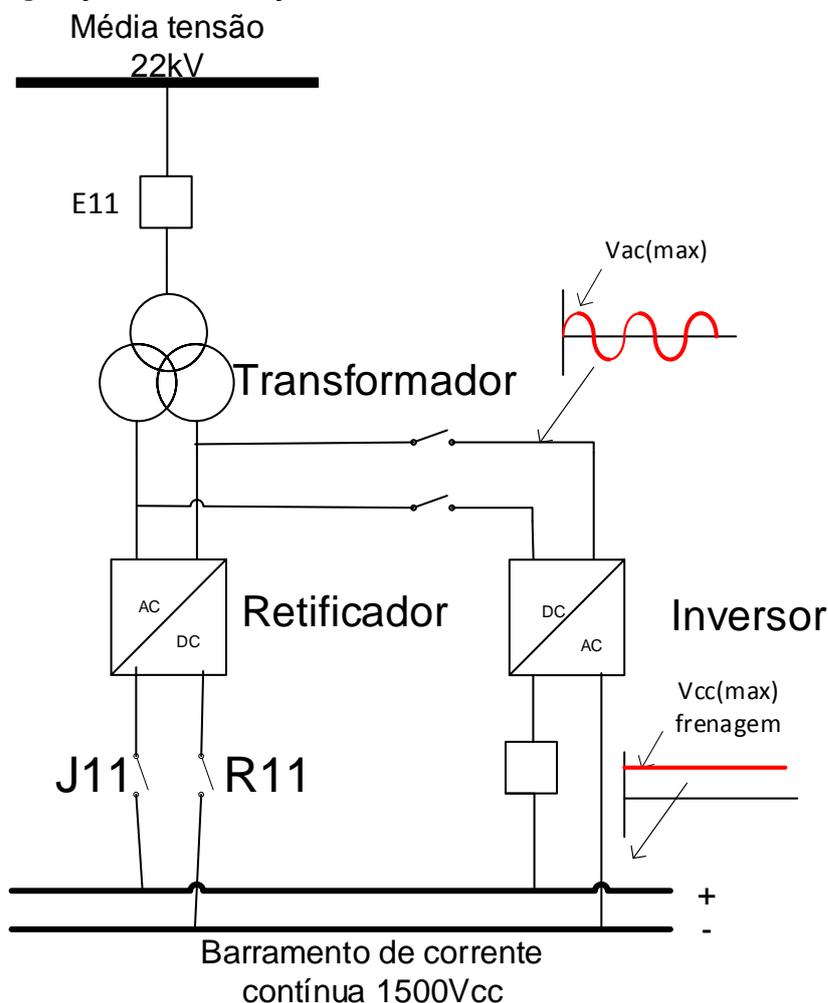
Desenvolvedor	Potência (kW)	Local de desenvolvimento
Asltom	300	Implementado na linha de trem T1 da RATP na cidade de Paris na França
Siemens	2200	Em teste no Metro de Oslo
Ingeber	1500	No metrô de Bilbao iniciados os testes em 2009
Enviline (ABB)	1000	Em implementação no VLT de Lódz
ABB	1000	Na linha 4 de metrô da cidade de São Paulo iniciada a implementação em 2009

Fonte: (GONZALEZ-GIL, et al., 2014)

Os inversores implantados nos sistema de transporte sobre trilho da cidade de São Paulo utilizaram tiristores na implementação da ponte inversora e se valeram do

transformador do grupo retificador (que é alimentado pelo secundário) para devolver a energia para a rede de distribuição, conforme ilustrado pela figura 3.

Figura 3: Configuração da subestação inversora de linha 4 do metrô da cidade de São Paulo



Fonte: (autor)

No sistema de transporte sobre trilho da cidade de São Paulo, na década de 80, a antiga concessionária de transporte Fepasa, hoje CPTM, instalou subestações inversoras na Linha 8 Diamante. Neste projeto foram desenvolvidos inversores tiristorizados nas subestações Barra Funda e Imperatriz Leopoldina, fabricados pela Siemens, e nas subestações de Osasco, Santa Terezinha e Santa Rita fabricados pelas Jeumont-Schneider. A concepção do sistema de inversores instalados tinha, como filosofia, devolver a energia excedente para a concessionária.

Os inversores de fabricação Siemens e Jeumont-Schneider foram uma experiência sem sucesso de conversão CC-CA dentro da Fepasa, devido à grande quantidade de defeitos que este sistema apresentou. Como a concepção de projeto era a

devolução de energia à concessionária, devido às variações na tensão de entrada disponibilizada pela concessionária, ocorria, frequentemente, a atuação da proteção dos inversores tiristorizados.

Atualmente estão em fase de implantação os inversores para recuperação na energia na Linha 4 amarela do metrô da cidade de São Paulo.

Os problemas principais na implantação das subestações inversoras na linha 4 do metrô de São Paulo foram:

- a) Ocorrência de falhas no controle do desligamento dos tiristores e curto-circuitos, causados por variações nos níveis de tensão da rede elétrica e da frenagem regenerativa;
- b) Curto ciclo de aproveitamento da energia, gerado por intervalos pequenos entre os trens devido à elevada demanda de passageiros.

2.3. ALGORITMOS DE CONTROLE PARA OTIMIZAÇÃO DO DIAGRAMA HORARIO

Sincronizar a aceleração e frenagem de trens diferentes, por meio de algoritmos de controle para otimização do diagrama horário dos trens do metrô é uma solução com baixo custo de implantação, mas eficaz, para maximizar o uso de frenagem regenerativa nos sistemas metroviários urbanos. Esta solução permite economizar energia de tração, mas também ajuda a reduzir os picos de energia causados por aceleração simultânea de vários trens no sistema.

Vários estudos tem proposto algoritmos de controle para a otimização do diagrama horário para aumentar a recuperação da energia proveniente da frenagem dos trens no sistema metroviário urbano. Os principais trabalhos são:

- a) Nasri desenvolveu um método de otimização que, com base em um algoritmo genético, determina os valores ótimos do tempo de reserva que maximizam o uso de frenagem regenerativa (NASRI, et al., 2010);

- b) O grupo de pesquisa de Pena propuseram um novo diagrama horário para a linha 3 do metrô de Madrid, resolvendo um problema de otimização programação linear. Após uma semana de aplicação do sistema, obteve-se uma economia de energia média de 3%, embora os autores afirmam que este número pode ser de 7% se restrições de operacionais fossem diminuídas (PEÑA-ALCARAZ, et al., 2011);
- c) O estudo de Boizumeau, Leguay e Navarro demonstrou que no sistema de metrô Rennes uma economia anual de 12% foi obtida por meio da otimização do diagrama horário (BOIZUMEAU, et al., 2011).

Para obtenção de melhores índices de economia de energia por meio da otimização do diagrama horário é necessário uma implementação em tempo real de um sistema de controle que determine as melhores estratégias de condução do trem.

Um sistema de controle em tempo real deve recalcular automaticamente a programação em caso de imprevistos, como atrasos e incidentes menores. Os custos relativamente baixos de investimento associado a esta medida, especialmente se comparado com a instalação de acumuladores de energia ou de subestações inversoras, o torna uma opção fundamental para o aumento dos benefícios de frenagem regenerativa no transporte metroviário.

3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS E OPERACIONAIS DO SISTEMA DE TRAÇÃO DO METRÔ DA CIDADE DE SÃO PAULO

A operação de um sistema metroviário, como por exemplo, o da cidade de São Paulo, é uma tarefa de extrema responsabilidade, considerando que 1.098.097.822 usuários foram transportados no ano de 2012 (METRÔ, 2012). Para controlá-la existe o Centro de Controle Operacional (CCO) onde os operadores, auxiliados por computadores, controlam e regulam toda a movimentação do sistema.

Sistemas de automação controlam o desempenho e o intervalo entre os trens que circulam no sistema, monitoram a energia e supervisionam todas as estações e principais equipamentos da rede. A ocorrência de qualquer eventualidade é informada via um sistema de rádio e telefonia que liga o CCO ao pessoal operativo das estações, às cabines dos trens e às torres de controle dos pátios de estacionamento das linhas.

A tabela 6 ilustra os três modos de operação do sistema metroviário da cidade de São Paulo.

Tabela 6: Modos de operação do sistema de metrô da cidade de São Paulo

Modo de operação	Características do modo de operação
Automático	No modo de operação automático, a movimentação dos trens é totalmente controlada pelos computadores.
Semiautomático	No modo semiautomático, a parada da composição, o controle das portas, a aceleração e a frenagem ficam a cargo do operador. O controle da movimentação dos trens continua sendo feito pelo sistema de sinalização
Manual	No modo Manual todos os controles do trem ficam a cargo do operador com uma limitação de velocidade de 20km/h.

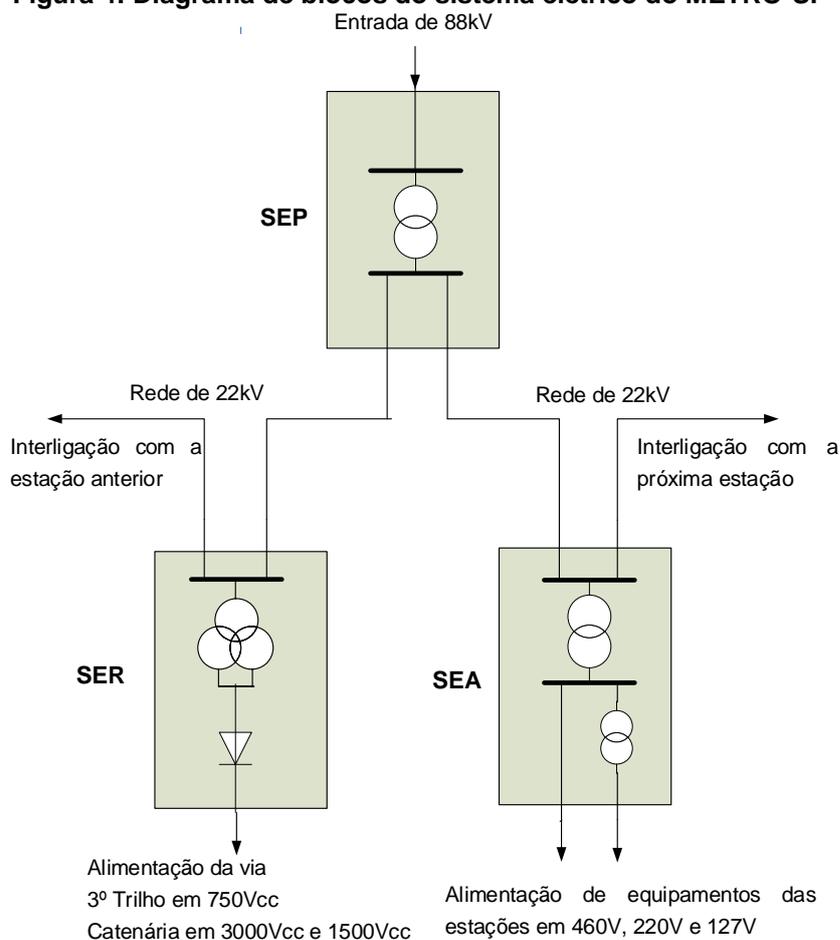
Fonte: (Autor)

O sistema de sinalização e controle de tráfego controla a velocidade dos trens, mantendo a distância mínima entre eles, impedindo colisões. Se for ultrapassado o limite da velocidade permitida, sua frenagem é automaticamente acionada. O uso do procedimento de falha segura garante que qualquer falha no sistema de sinalização gere uma condição de operação mais restritiva. Em casos de emergência, é utilizada

a operação manual. O operador controla a movimentação dos trens, recebendo orientação por rádio do CCO. A velocidade de tráfego é limitada a 20 km por hora.

Vasconcelos (2005) descreve o sistema de alimentação elétrica das linhas 1, 2 e 3 do metrô de São Paulo. A Figura 4 ilustra, em diagrama de blocos, do sistema padrão de alimentação elétrica utilizado nos projetos do metrô de São Paulo. (VASCONCELOS, 2005)

Figura 4: Diagrama de blocos do sistema elétrico do METRÔ-SP



Fonte: (VASCONCELOS, 2005)

A configuração básica de um sistema de alimentação elétrica, aplicado a sistemas metroviários, é constituída, basicamente, por três tipos de subestações com funções distintas (VASCONCELOS, 2005), conforme descrito:

a) **Subestações Elétricas Primárias (SEP)** - recebem energia diretamente da

concessionária;

- b) **Subestações Elétricas Auxiliares (SEA)** - alimentam os equipamentos das estações;
- c) **Subestações Elétricas Retificadoras (SER)** - fornecem energia elétrica para os trens por intermédio do 3º trilho.

3.1. SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO ELÉTRICA.

A rede de alimentação elétrica é composta por todos os equipamentos de geração e fornecimento de energia elétrica, além do coletor de corrente dos trens (SCHMIDT, 1988). Sob o aspecto técnico, ela compreende todas as instalações fixas do sistema de tração elétrica (KIEßLING, et al., 2001). Nas instalações fixas pode-se distinguir o circuito alimentador, as subestações de tração, as cabines de paralelismo e a rede de suprimento de energia, que pode incluir a alimentação de força e luz das estações e das vias (DE CASTRO & ALOUCHE, 1981).

O projeto de eletrificação de um sistema metroviário requer uma solução para três aspectos básicos (DELATTRE & SEILER, 1983):

- a) O tipo de corrente elétrica de alimentação do sistema de tração;
- b) O modo de captação da corrente elétrica efetuada pelo veículo;
- c) A estrutura da rede de alimentação a ser construída, incluindo a conexão com a rede pública de alimentação local.

Dentre os sistemas de alimentação elétrica existentes na tração metroviária, com relação ao tipo de corrente de alimentação, destacam-se:

- a) Corrente contínua;
- b) Corrente alternada monofásica.

A alimentação em corrente contínua requer a instalação de subestações retificadoras. Para que a energia proveniente da frenagem regenerativa dos trens possa ser aproveitada e retornada à rede pública de alimentação, as subestações devem ser equipadas com inversores.

Uma das características importantes do sistema de alimentação elétrica é o nível de tensão. Atualmente, os transportes urbanos são alimentados, em quase sua totalidade, em corrente contínua, com tendência à utilização de tensões nominais nos valores de 750 V e 1500 V. O valor de 3000V é utilizado nas linhas de subúrbio ou trens metropolitanos por razões históricas (PIRES, 2006).

No Brasil a tração elétrica está concentrada nos transportes urbanos, não havendo linhas eletrificadas de longa distância. Deste modo, todas as linhas eletrificadas no país, com exceção da Estrada de Ferro do Corcovado, são alimentadas em corrente contínua.

A grande maioria dos sistemas de alimentação em corrente contínua não possui um sistema de geração próprio. O seu suprimento de energia provém da rede pública de fornecimento de energia. A conversão da corrente trifásica em corrente contínua na tensão nominal da linha de contato é feita por meio de subestações retificadoras. O uso de subestações inversoras tem se tornado viável por meio do desenvolvimento dos tiristores retificadores de alta potência. Nestas subestações, a energia regenerada pelos trens pode retornar à rede pública de alimentação quando existem, no momento, trens para utilizá-la.

O nível de tensão do sistema de alimentação elétrica usado em sistemas metroviários tem sido determinado, ao longo do tempo, por diferentes motivos como, por exemplo, o estágio tecnológico da época. Este fato determinou uma variedade de níveis de tensão, o que levou alguns órgãos a normatizarem as tensões nominais utilizadas em sistemas metroviários.

Atualmente, no sistema metroviário de São Paulo, o sistema de distribuição de energia para os trens é em corrente contínua com a tendência ao uso de tensões nominais nos valores de 750 V e 1500 V. O valor de 3000 V é utilizado nas linhas de trens metropolitanos da CPTM – Companhia Paulista de Trens Metropolitanos por razões históricas.

A Tabela 7, extraída da norma EN50163, mostra os níveis de tensão para os diversos sistemas de alimentação (EN50163:2004, 2005).

Tabela 7: Níveis de tensão para os diversos sistemas de alimentação

Sistema de alimentação	Menor tensão não permanente [V]	Menor tensão permanente [V]	Tensão nominal [V]	Maior tensão permanente [V]	Maior tensão não permanente [V]
Corrente contínua		400	600	720	770
		500	750	900	950
		1000	1500	1800	1950
		2000	3000	3600	3900
Corrente alternada	11000	12000	15000	17250	18000
	17500	19000	25000	27500	29000

Fonte: (EN50163:2004, 2005)

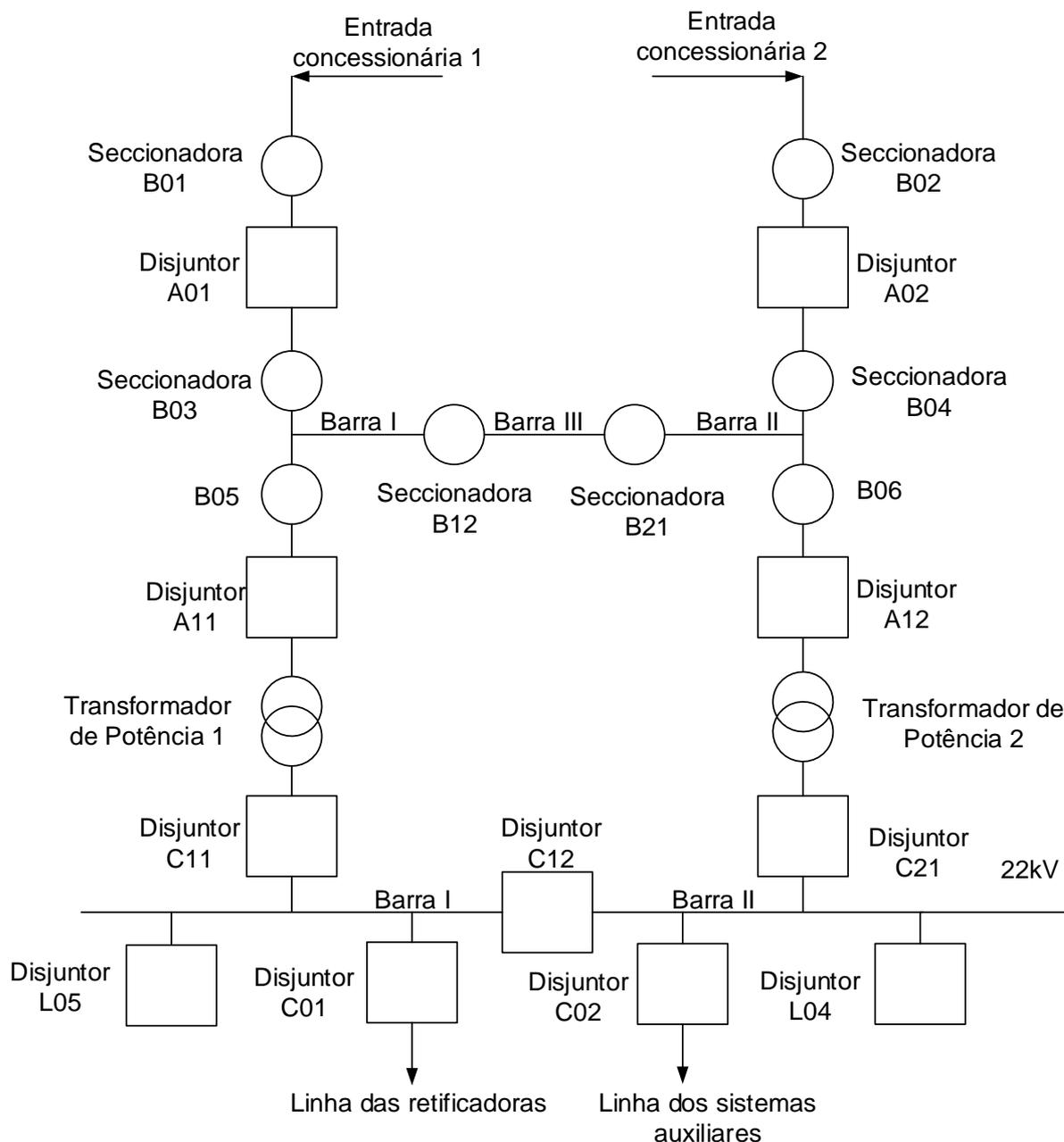
3.2. DESCRIÇÃO DAS SUBESTAÇÕES PRIMÁRIAS (SEP)

As SEPs - Subestações Elétricas Primárias têm a finalidade de receber a alimentação da concessionária de energia em alta tensão (no caso do metrô de São Paulo 88 kV), e transformá-la em 22 kV, tensão regulada por meio de transformadores reguladores, com Comutador de Taps Sob-Carga, controlados por reguladores de tensão ajustados para a tensão nominal de 22kV.

Esta tensão é distribuída, por meio de duas linhas de 22 kV independentes - uma para a rede de tração e outra para a rede de sistemas auxiliares - para a SER tronco que, por sua vez, redistribui para o restante do sistema por meio de redes de cabos de 22 kV interligadas separadamente às SERs e às SEAs.

As SEPs da Linha I-Azul do metrô de São Paulo são em número de três e cada uma possui três transformadores de 88/22 kV, com potência de 14, 7 MVA, operando dois em serviço e um em reserva. A figura 5 mostra Diagrama unifilar de uma SEP.

Figura 5: Diagrama unifilar típico de uma SEP



Fonte: (VASCONCELOS, 2005)

As SEPs da Linha 3-Vermelha do metrô de São Paulo são em número de quatro e cada uma possui dois transformadores de 88/22kV, com potência de 33,3MVA, operando os dois em serviço, e cada um com capacidade de assumir, sem restrições, toda a carga da SEP.

Em todas as linhas metroviárias da cidade de São Paulo, cada SEP corresponde a um setor elétrico de 22 kV, alimentado por ela de modo independente. Em caso de falha em uma SEP, entra em operação um sistema automático denominado TAS -

Transferência Automática de Setores.

O TAS executa as funções de isolar a SEP e transferir a carga desse setor à primária adjacente, de forma que o setor afetado passe a ser alimentado por meio dos disjuntores de Interligação de Setores. Nesta condição de perda de apenas uma SEP adjacente, não há restrição operacional ao Sistema de Alimentação Elétrica que foi dimensionado para suportá-la, garantindo-se, assim, a continuidade de serviço.

3.3. DESCRIÇÃO DAS SUBESTAÇÕES AUXILIARES (SEA)

Em cada estação de passageiros há uma Subestação Auxiliar (SEA) instalada. A sua finalidade é receber a alimentação de 22kV da rede de distribuição interna do Metrô, transformá-la para baixa tensão, alimentando, assim, todos os equipamentos instalados nas estações de passageiros, vias, túneis e pátios de manobras, além do prédio do Centro de Controle Operacional (CCO). Tem, também, a função de distribuir a alimentação de 22 kV para as SEAs vizinhas.

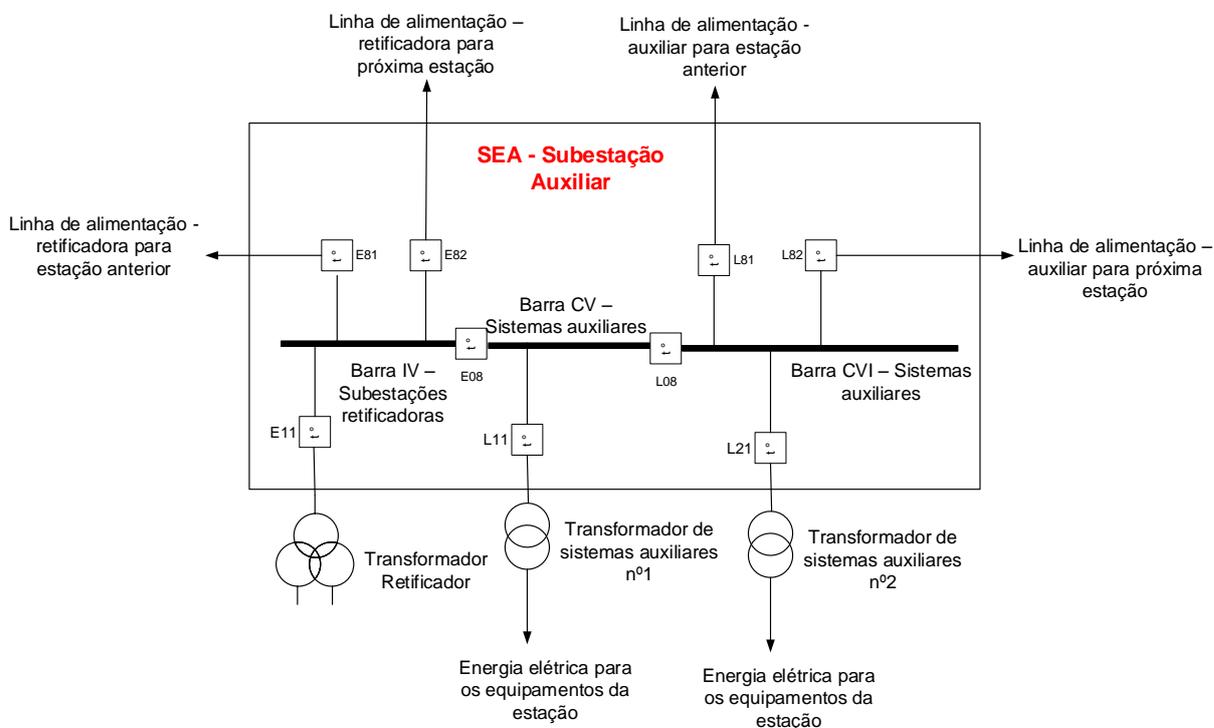
Uma SEA típica constitui-se de barramentos interligados entre si, por meio de disjuntores. Esses barramentos suprem energia, também por disjuntores, para o transformador retificador da subestação retificadora, e para os serviços auxiliares das estações, por meio de dois transformadores de serviços auxiliares 22kV / 460V.

Em cada estação haverá uma subestação auxiliar, constituída normalmente por dois barramentos, separados por um disjuntor de interligação, onde em cada barramento tem uma saída para transformador auxiliar, responsável pelo fornecimento de energia para os sistemas auxiliares da estação. Como por exemplo, iluminação, escadas rolantes, elevadores, ventilação entre outros.

Em algumas subestações auxiliares existe o barramento de fornecimento de energia para a subestação retificadora, constituído por uma barra única. Nas SEAs com fornecimento de energia para subestação retificadora existe a interligação da barra retificadora com a auxiliar, como recurso de socorro.

A figura 6 ilustra a configuração típica de uma subestação auxiliar do sistema metroviário da cidade de São Paulo.

Figura 6: Desenho da configuração típica de uma SEA



Fonte: (Autor)

As subestações auxiliares são constituídas por:

- Dois cubículos que abrigam os disjuntores de entrada 22kV, um para linha retificadora e um para linha auxiliar;
- Dois cubículos que abrigam os disjuntores de interligação de barras que interligam as barras CIV e CV (Disjuntor E08) a as barras CV e CVI (Disjuntor L08). Em condições normais, o disjuntor (E08) opera em posição "aberto" e o disjuntor (L08) opera em posição "fechado";
- Quatro cubículos para interligação de estações em sistema radial para alimentação das cargas de tração e de serviços auxiliares da Linha de metrô. Dos quatro circuitos, os que derivam das barras CIV são destinados à alimentação das cargas de tração, e os que derivam das barras CV e CVI são destinados à alimentação das cargas auxiliares;
- Um cubículo de saída, que alimenta a Subestação Retificadora;

- e) Dois cubículos de saídas, que alimentam os transformadores Auxiliares TR1 e TR2, para atender aos serviços auxiliares da própria subestação.
- f) Três cubículos de medição (um para cada barra) que abrigam seus respectivos transformadores de potencial para alimentação dos circuitos de proteção e medição.

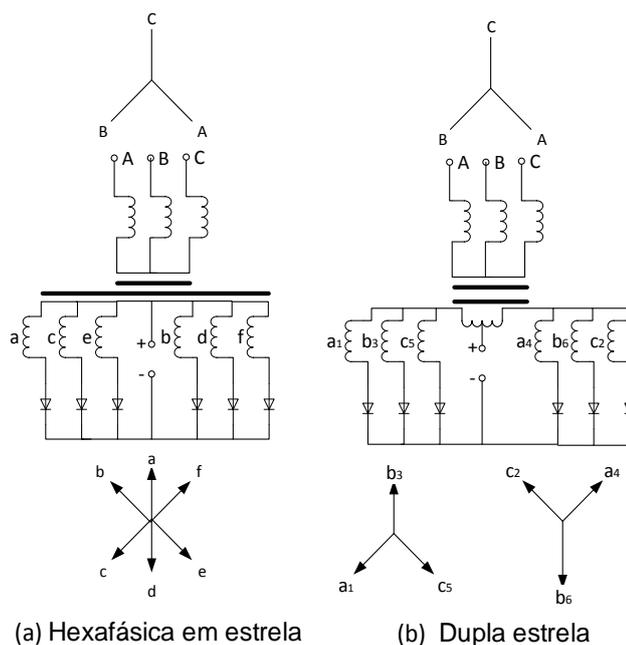
3.4. DESCRIÇÃO DAS SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS (SER)

Subestação retificadora é uma parte da rede de distribuição que liga a linha de tração com o sistema de distribuição em alta tensão da concessionária de energia. Na subestação retificadora a corrente trifásica alternada é convertida em corrente contínua para prover o suprimento de energia ao sistema de tração metrô-ferroviário.

Nas subestações retificadoras o grupo retificador converte a tensão trifásica alternada em corrente contínua e o transformador faz a conexão do grupo retificador com o sistema de distribuição de energia elétrica alternada. Podem-se dividir os esquemas de ligação dos retificadores e do transformador em duas categorias (TESSIER, 1978):

- a) Conexões de via simples: As conexões de via simples e retificação de meia onda, utilizadas em sistemas mais antigos com retificadores a vapor de mercúrio, podem ser do tipo hexafásica em estrela simples ou dupla estrela (TESSIER, 1978) e (SCHMIDT, 1988), como mostra a figura 7.

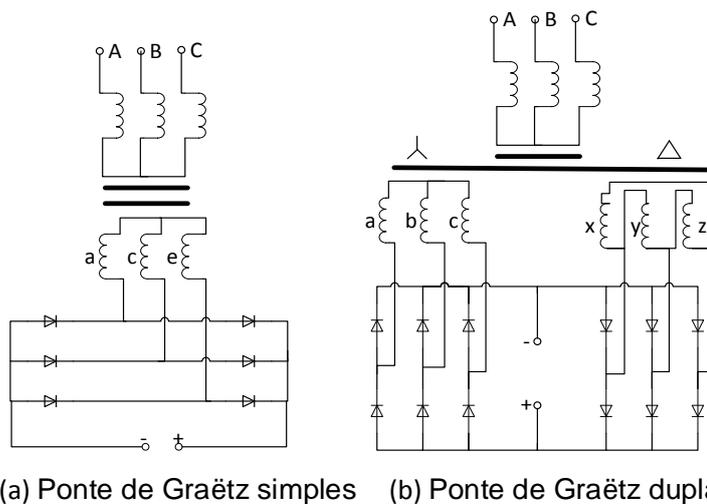
Figura 7: Diagrama elétrico de conexões de via simples de uma SER



fonte: (PIRES, 2006)

- b) Conexões de via dupla: As conexões de via dupla e uma retificação de onda completa, utilizadas em sistemas mais modernos, podem ser uma ponte trifásica, conhecida na Europa como ponte de Graëtz, simples ou dupla. A característica comum destas conexões é que os terminais de fase do transformador são ligados alternadamente aos anodos e aos catodos dos retificadores (TESSIER, 1978), como mostra a figura 8.

Figura 8: Diagrama elétrico de conexões de via dupla de uma SER



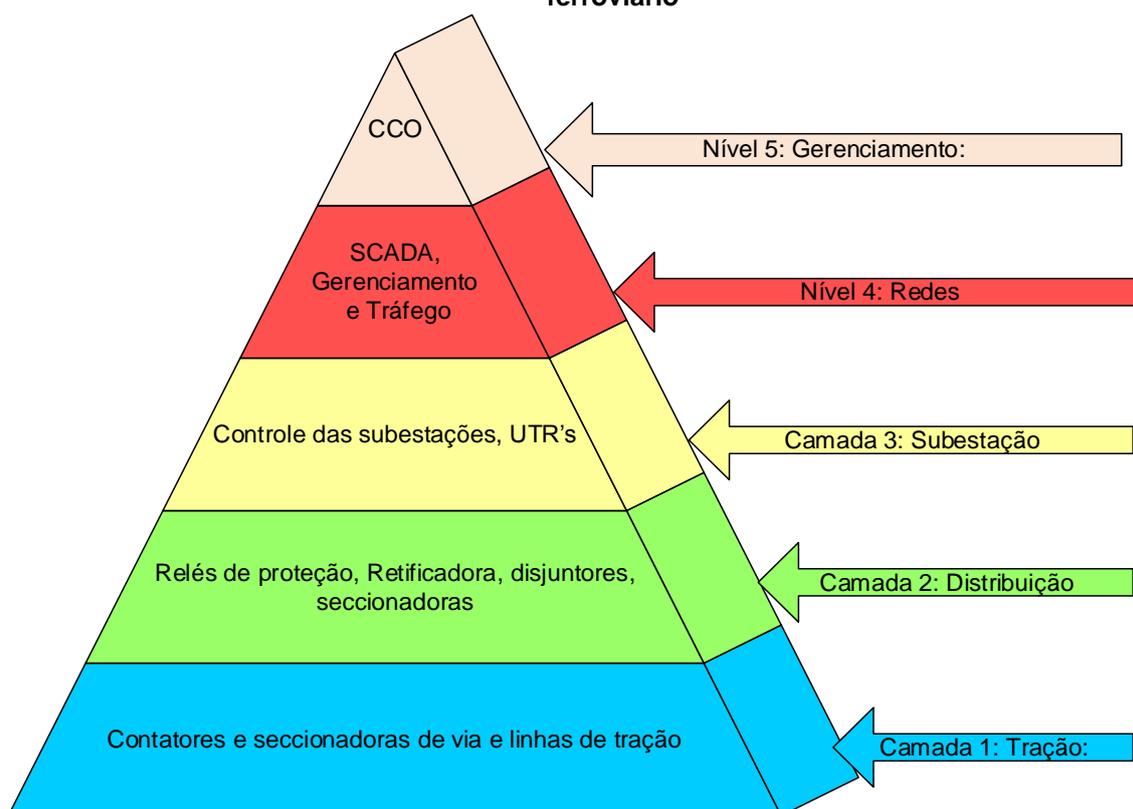
fonte (PIRES, 2006)

O caminho de retorno para a energia elétrica acontece por meio do contato rodar-trilho ou escova de retorno à terra.

3.4.1. Automação da subestação retificadora (SER)

Nesta tese de doutorado o sistema de automação de uma subestação retificadora está representado pelo modelo da pirâmide de automação com seis níveis hierárquicos. A Figura 9 ilustra um modelo desenvolvido com cinco níveis, adaptado aos processos metroviários. (NOTHCOTE-GREEN & WILSON, 2006).

Figura 9: Hierarquia de automação típica de um sistema de alimentação elétrico metrô-ferroviário



Fonte: (Autor)

Nível 5: Gerenciamento: este nível representa o topo da hierarquia, ou seja, é responsável pela determinação da estratégia e política global da operação do sistema de transporte metrô-ferroviário. Programa das estratégias de operação baseado na análise da disponibilidade de recursos físicos,

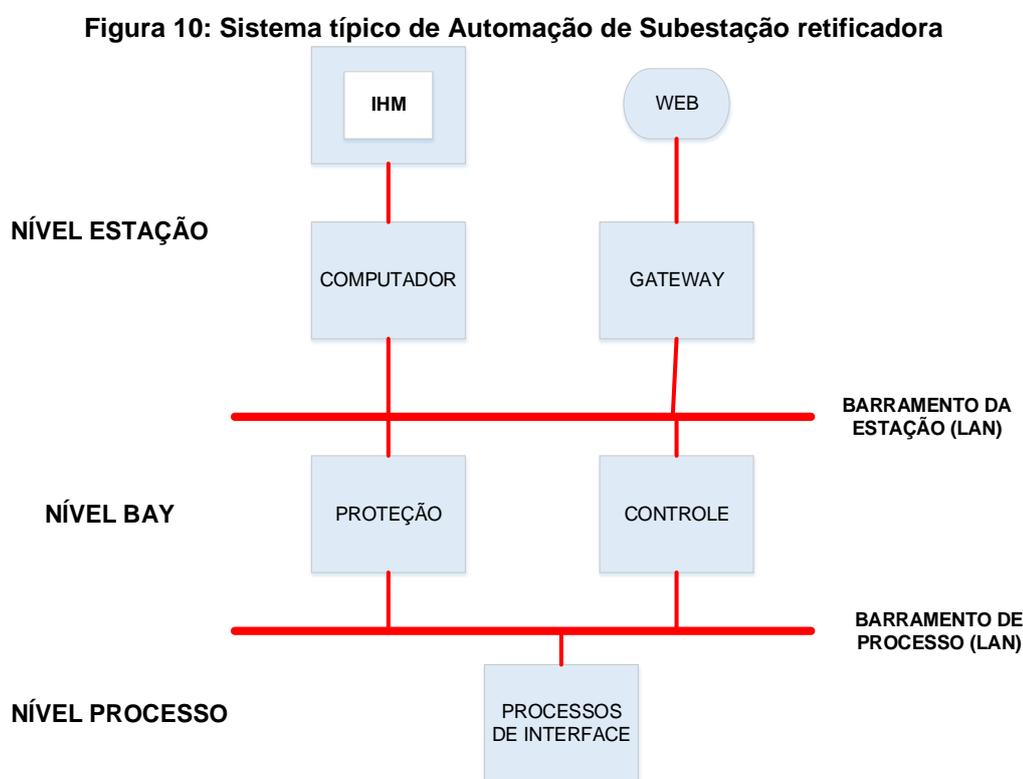
energia elétrica, recursos humanos e demanda de passageiro. O gerenciamento conjugado com informações dos outros níveis de controle gera informações que permitem a avaliação do desempenho da operação e a melhora dos modelos e algoritmos de controle da mesma. Neste nível encontra-se a figura do CCO.

- Nível 4:** Redes: neste nível de controle é realizada a integração dos sistemas de tráfego de trens, energia, passageiros, SCAP (bilhetagem) e auxiliares. Aí são gerados os valores de operação e demais parâmetros necessários para que se obtenha o melhor rendimento possível das instalações. Isto é feito por meio da execução de algoritmos de otimização que fornecem valores de acordo com os modelos matemáticos dos respectivos processos e que, teoricamente, produzirão o desempenho desejado.
- Nível 3:** Subestação: este nível de controle coordena, supervisiona e estabelece os controles integrados de todos os disjuntores de alimentação da linha de tração da subestação retificadora e registra os status dos relés de proteção digital. Concentra as informações sobre toda a subestação retificadora em salas de controle, permitindo que os operadores tomem decisões sobre políticas a serem adotadas e sobre os valores dos pontos de operação dos controladores do nível inferior. Estes pontos de operação podem também ser recebidos do nível hierárquico superior e, neste caso, a operadora central apenas monitora os valores recebidos.
- Nível 2:** Distribuição: este nível responsabiliza-se pelo controle, propriamente dito, dos sistemas de distribuição da tensão, fazendo a aquisição de dados e gerando variáveis de controle por meio da aplicação de algoritmos. Ainda neste nível situam-se os Controladores Lógicos Programáveis (CLP's), relés de proteção digital, disjuntores e demais drivers de acionamento, com integração parcial das funções.
- Nível 1:** Tração: a camada mais baixa de controle é onde o sistema entrega energia ao trem; aí se requerem os sistemas de medição mais modernos a fim de permitir o controle da carga e a diminuição nas interferências operacionais, com a rápida tomada de decisões.

Esta divisão do processo do controle em camadas é feita porque, na prática, as responsabilidades do controle dentro do gerenciamento são organizadas similarmente (MORAES & CASTRUCCI, 2006).

A divisão de camadas do controle e da arquitetura resultante deve levar em conta a hierarquia de controle, suas contribuições e interações com CCO.

O sistema típico de automação de subestação retificadora normalmente apresenta três níveis, que são: de processo, de BAY² e nível de estação, conforme pode ser visualizado na figura 10.



Fonte: (Autor)

Com o advento de novas tecnologias utilizadas em subestações elétricas retificadoras, milhares de dados digitais e analógicos tornaram-se disponíveis em um equipamento eletrônico inteligente (IED - Intelligent Electronic Device³).

² Um BAY típico de uma subestação elétrica retificadora é composto por disjuntores, seccionadoras, transformadores de corrente e um seccionador by-pass, de modo a permitir a manutenção do disjuntor e sua seccionadora de isolamento, sem interferência no fornecimento de energia.

³ Um dispositivo eletrônico inteligente (IED) é um termo usado nas indústrias de energia elétrica para descrever controladores de equipamentos do sistema de energia, baseados em microprocessadores, como disjuntores, transformadores e bancos de capacitores.

Em 2006, nas estações inauguradas na linha 2 do metrô da cidade de São Paulo tiveram as primeiras SERs implementadas automação utilizando IED's, devido à tecnologia da época, a comunicação entre os dispositivos do nível de estação e o nível de bay era realizada através de protocolos incompatíveis entre si, como por exemplo: IEC 60870, DNP, Modbus, entre outros protocolos proprietários e não proprietários.

Em 1997, o IEC (International Electrotechnical Commission) , com a IEC 61850 iniciou os trabalhos na definição do barramento padrão para subestações, resultando na atual especificação da norma que padroniza a comunicação entre os dispositivos de proteção e controle (REIN JUNIOR, 2006).

As necessidades da comunicação dos projetos de automação de SER atualmente incluem:

- a) Comunicação de alta velocidade de IED para IED;
- b) Comunicação entre redes do sistema;
- c) Alta disponibilidade;
- d) Tempos de envio garantidos;
- e) Interoperabilidade entre diferentes fabricantes;
- f) Auto-configuração;
- g) Alta segurança;
- h) Facilidades de transferência de arquivos;
- i) Facilidade para manejar amostras de dados de tensão e corrente.

Ainda que, inicialmente, o protocolo de comunicação baseado na norma IEC 61850 tenha sido concebido apenas para uso interno nas subestações, estudos estão sendo realizados para utilizá-lo, também, na comunicação entre subestações e subestação – centro de controle.

3.4.1.1. Arquiteturas de hardware da automação e controle da SER

A arquitetura de hardware da SER do sistema metroviário é fundamentada em tecnologias aplicadas em automação industrial. Utiliza instrumentos já empregados neste campo do setor produtivo para viabilizar uma rápida reposição de dispositivos assim como uma manutenção mais ágil e eficaz.

As tecnologias levadas em consideração neste projeto serão:

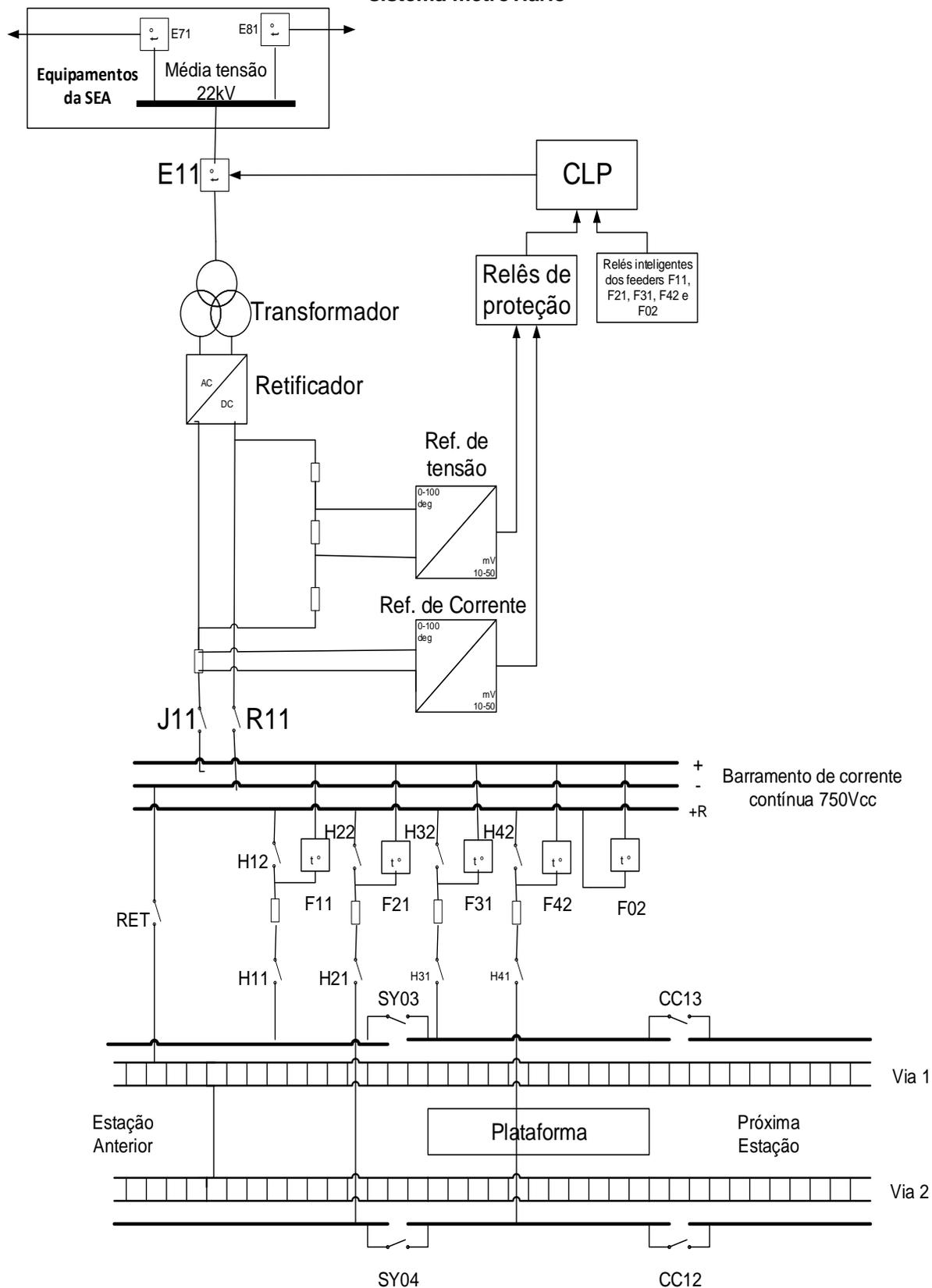
- a) Relés de proteção multifunção;
- b) Controlador Lógico Programável;
- c) Antena e receptor GPS para sincronização dos dispositivos de proteção;
- d) Redes campo destinadas a controle e proteção, padronizadas pela norma IEC61850;
- e) Redes baseadas no TCP/IP destinadas a controle e supervisão, padronizadas pela norma IEC61970;
- f) Rede de sincronização dos dispositivos de proteção padrão;
- g) Software supervisor de mercado.

Os relés de proteção digitais formam a arquitetura da automação de uma SER, estando todos eles interligados em rede. Cada um dos dispositivos é conectado a uma rede com as funções de comando, aquisição de dados, parametrização e sincronização dos equipamentos.

A sincronização de cada dispositivo é feita por meio da rede padrão TCP/IP conectada a um receptor GPS que fornece aos equipamentos IED's a hora exata por meio do Sistema de Posicionamento Global (GPS - Global Position System).

A figura 11 mostra arquitetura de hardware e diagrama unifilar geral da subestação retificadora do sistema metroviário.

Figura 11: Arquitetura de hardware e diagrama unifilar geral da subestação retificadora do sistema metroviário

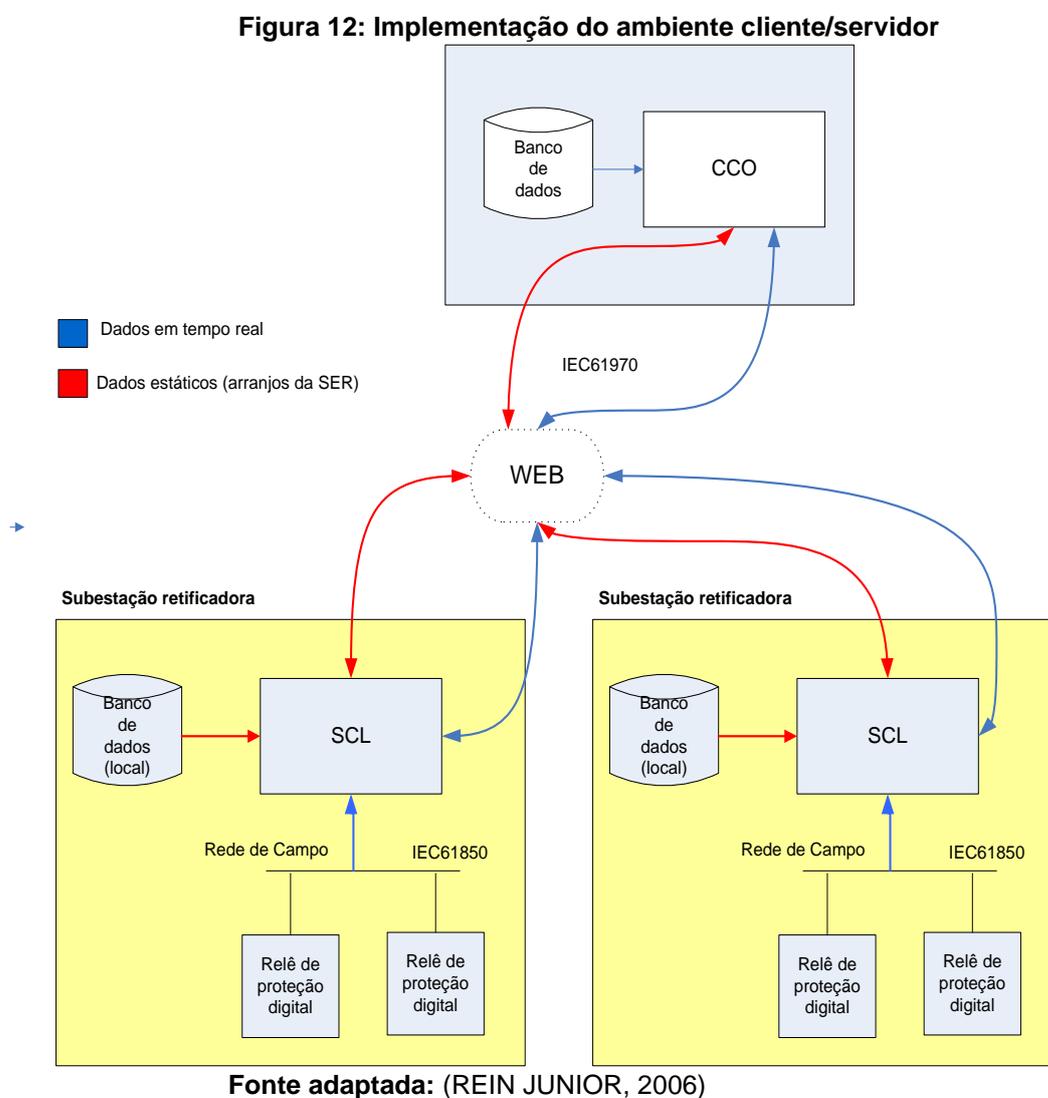


Obs: CC13 e CC12 normalmente fechados

Fonte: (Autor)

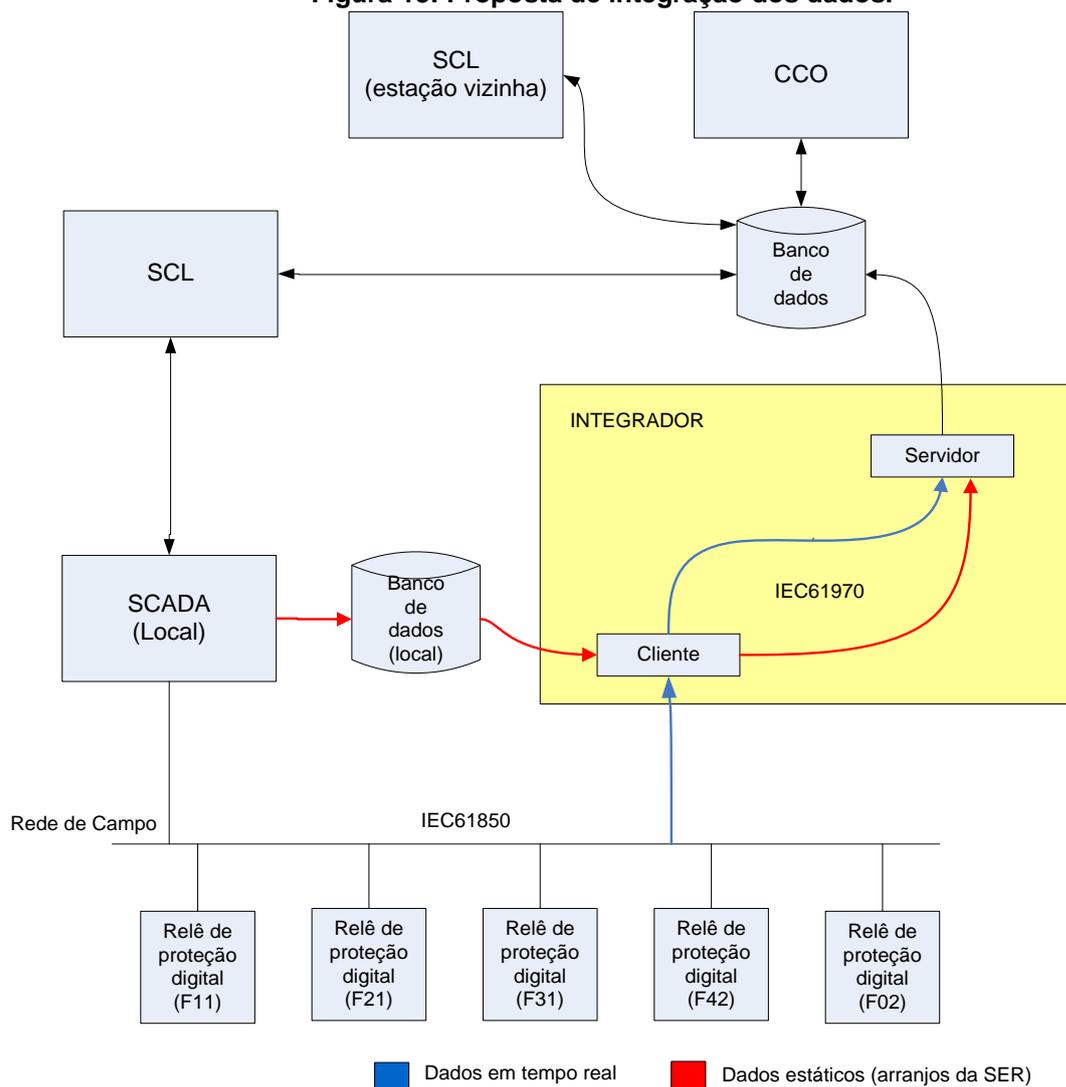
3.4.1.2. Arquiteturas de software da automação e controle da SER

A arquitetura software é baseada no modelo cliente/servidor para troca de informações entre a subestação retificadora e o centro de controle. Um mesmo servidor poderá receber dados de vários clientes, simultaneamente. Isto permite que várias subestações retificadoras possam transmitir informações a um mesmo ambiente corporativo. A figura 12 ilustra esta situação, em que as subestações retificadoras estão conectadas, por meio do cliente, a um mesmo servidor (REIN JUNIOR, 2006).



A figura 13 mostra uma visão geral de como é realizada a integração dos dados da subestação retificadora com o sistema de alimentação elétrica metroviário.

Figura 13: Proposta de integração dos dados.



Fonte adaptada: (REIN JUNIOR, 2006)

3.5. SISTEMA DE TRAÇÃO METROVIÁRIA

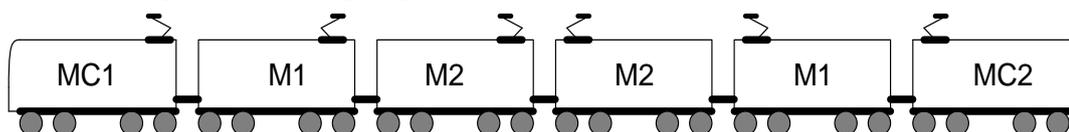
A configuração típica dos trens da linha 4 amarela do metrô da cidade de São Paulo mostra uma composição de 6 carros. Ela está ilustrada na figura 14.

Os carros da linha 4 amarela do metrô de São Paulo são divididos em duas classes:

- a) os carros de controle ;
- b) os carros de tração.

Os carros de controle são denominados de MC1 e MC2 e acham-se posicionados nas extremidades da composição; os carros intermediários de tração são denominados de M1 e M2. Observe-se que, para cada carro tipo MC1 ou MC2 existem dois carros M1 e M2, conforme ilustra a figura 14.

Figura 14: Configuração típica dos trens do metrô de São Paulo.



Fonte: (Autor)

No metrô da cidade de São Paulo todos os carros possuem sistema de tração, mesmo os de controle.

Um sistema de tração metroviário é composto dos motores de tração, caixa de redução, rodas, sapata, drive de acionamento dos motores e freios que compõem o truque.

3.5.1. Motor de indução assíncrono na tração elétrica

Os motores de Corrente Alternada como os de Corrente Contínua têm a mesma estrutura básica; porém, existem diferenças e, por vários motivos, os motores CC foram os preferidos para aplicação na tração elétrica, tendo sido muito utilizados ao longo do tempo. Atualmente, a eletrônica de potência permite o uso de motores CA e, para a grande maioria dos trens construídos hoje, esse tem sido o motor empregado.

Os limites tecnológicos e as diferenças técnicas entre os motores CC e CA foram os principais fatores que favoreceram a utilização dos motores CC a longo do tempo, pois os mesmos dispunham de características de torque adequado para aplicação na ferrovia e eram simples de serem controlados (SANTOS, 2007).

A partir do início da década de 1980, com o progresso da eletrônica de potência, os motores trifásicos de corrente alternada tornaram-se uma alternativa mais eficiente em relação aos motores CC devido:

- a) Os motores CA são mais simples de serem construídos, não requerem escovas para funcionar e são mais leves para uma potência equivalente;
- b) A eletrônica de potência atual permite que os motores CA sejam, efetivamente, controlados, para melhorar tanto a aderência como a tração;
- c) Os motores CA podem ser controlados por meio de controladores microprocessados com elevado grau de ajuste;
- d) Os motores CA podem regenerar corrente elétrica até quase a parada do trem, enquanto nos motores CC, a regeneração decai rapidamente em baixas velocidades;
- e) Condição de maior robustez e melhor manutenibilidade do que os motores CC.

A velocidade síncrona angular do motor ω_m é expressa pela equação 01, onde f é a frequência do motor e η_p é o número de polos.

$$\omega_s = \frac{4 \cdot \pi \cdot f}{\eta_p} \quad (01)$$

A velocidade síncrona do motor em RPM pode ser expressa por meio da velocidade de rotação, pela equação 02:

$$\eta_s = \frac{120 \cdot \omega_s}{4 \cdot \pi} \quad (02)$$

A velocidade do motor depende da sua carga, considerando-se que o rotor esteja girando na mesma direção do campo girante produzido pelo estator, a diferença entre a velocidade angular de rotação síncrona ω_s e a velocidade angular de rotação do rotor ω_r é conhecida como escorregamento. O escorregamento pode ser dado como uma porcentagem da velocidade angular síncrona, conforme equação 03:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (03)$$

O escorregamento também é determinante na forma de operação do motor, ou seja, se o funcionamento é motor ou gerador.

A operação será como motor quando a velocidade do rotor ω_r for menor que o campo magnético girante ω_s , fazendo com que o escorregamento seja positivo.

Já para a operação como gerador, a velocidade do campo magnético girante ω_s passa a ser menor que a velocidade do rotor ω_r , tornando o escorregamento negativo.

Esta característica traz uma vantagem, que é a operação com frenagem por meio dos motores do trem. Não que os sistemas anteriores não executassem esta operação, mas no caso do inversor, que é o equipamento que aciona estes motores, a frenagem é executada por meio da mudança dos tempos de acionamento dos semicondutores do inversor, sem o acréscimo de contadores ou chaves eletromecânicas para executar esta função.

A frenagem por meio dos motores elétricos transforma a energia cinética do trem em energia elétrica por meio dos motores, que durante esta operação se transformam em geradores. Esta energia pode ser devolvida para o sistema elétrico ou dissipada na forma de calor por meio de resistores. Este processo mostra as seguintes vantagens:

- a) Menor utilização do sistema pneumático, economizando pastilhas e outros componentes do sistema de freio;
- b) Colabora com a precisão da operação do trem, pois a frenagem será controlada pelo próprio controlador de tração.
- c) Economia de energia elétrica, pois a energia gerada pelo trem em frenagem pode ser absorvida por um trem que esta acelerando ou de partida de uma plataforma. Outra possibilidade é a devolução de energia elétrica para a concessionária de energia.

Para se obter a característica $F \times V$ necessária para a tração, o esforço máximo deve ser mantido constante durante a partida e para que esta operação se concretize, o fluxo magnético ϕ_m deve ser mantido constante. Este fluxo é mantido constante até a frequência nominal da máquina, e a partir deste ponto aumenta-se a

velocidade do motor mantendo a potência constante com o enfraquecimento do fluxo magnético como mostrado na figura 9. A relação que determina a velocidade angular do motor pode ser expressa pelas equações 04.

$$\omega_m = \omega_s(1 - s) \quad (04)$$

A velocidade do motor n_m em RPM é expressa pela equação 05.

$$n_m = n_s \cdot (1 - s) \quad (05)$$

A potência elétrica fornecida ao motor P_m é expressa pela equação 06, onde V_m é a tensão do motor, I_m a corrente do motor, $\cos\phi$ ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente do motor e η_m o rendimento do motor.

$$P_m = \sqrt{3} \cdot V_m \cdot I_m \cdot \cos\phi \cdot \eta_m \quad (06)$$

3.5.1.1. Sistema de acionamento dos motores

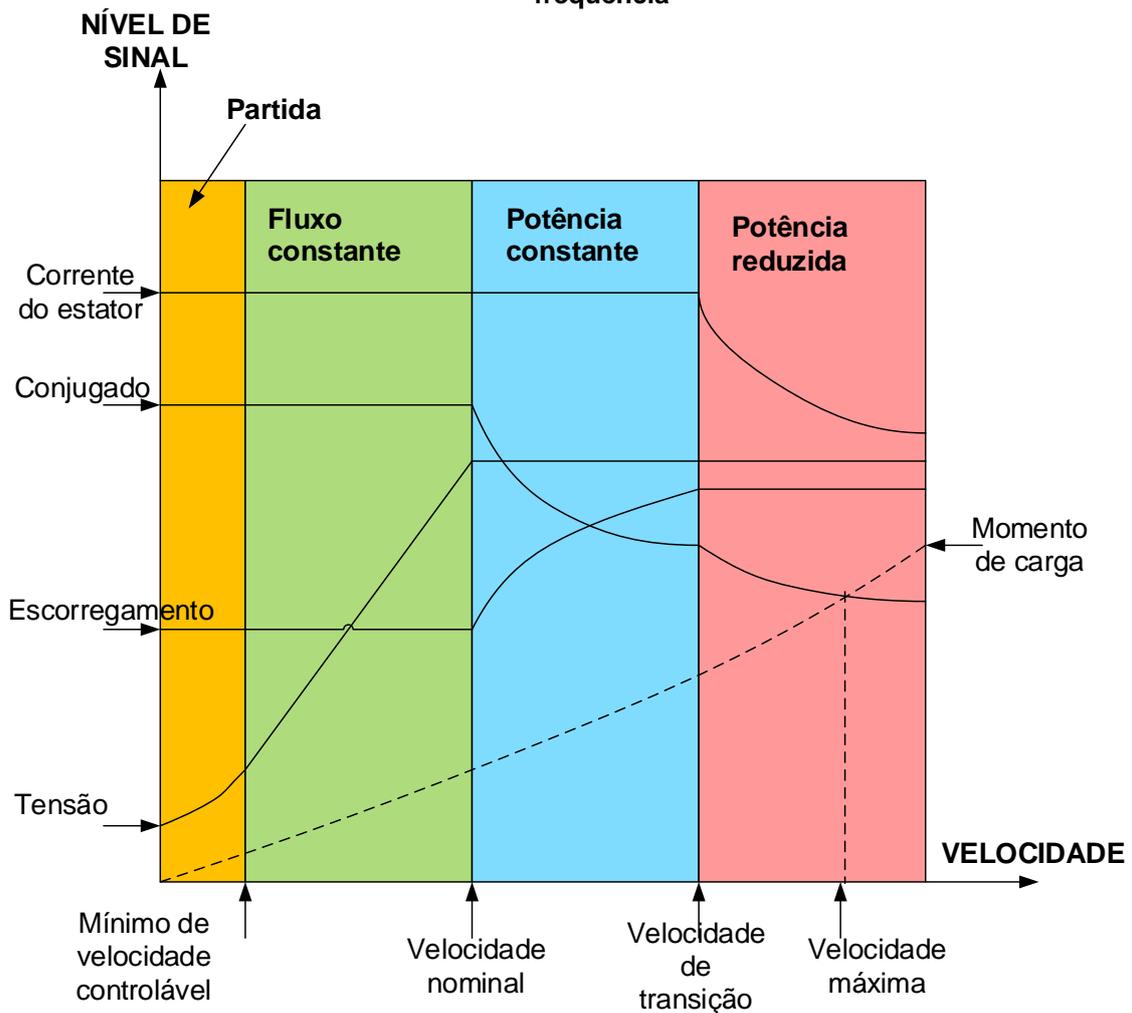
O acionamento dos motores de tração é executado por um equipamento denominado inversor VVVF (Variable Voltage Variable Frequency). Este inversor é o responsável pela conversão da forma de energia contínua para alternada. Os parâmetros do inversor VVVF de velocidade, aceleração, conjugado, entre outros, são informados pelo sistema de sinalização.

O inversor converte a corrente contínua proveniente da eletrificação da via em corrente alternada, por meio de uma técnica denominada “modulação por largura de pulso” (PWM). Esta técnica consiste no controle do tempo de acionamento e desligamento de semicondutores controlados. O controle adequado deste tempo sintetiza uma forma de onda alternada na frequência desejada para operação do motor.

Um controle adequado dos motores permite adaptar a amplitude e a frequência do sistema trifásico a cada evento em que se necessita do controle da velocidade de rotação do motor. A dinâmica do movimento do trem não é mais estabelecida somente pelas características do motor, como é o caso dos motores de corrente contínua do tipo série, mas pelo tipo de inversor que controla os motores de indução utilizados na tração.

Em sistemas de tração elétrica metroviária pode-se dizer que o motor de indução utilizado na tração é controlado pelo inversor. Este controle é realizado atuando na frequência e na amplitude da tensão trifásica, o que permite adaptar o conjugado do motor ao conjugado resistente e à aceleração desejada. Quando os motores de tração são alimentados por meio de inversores tipo VVVF, eles operam em três regiões distintas, que serão abordadas em seguida, conforme ilustrado na figura 15.

Figura 15: Características de operação de um motor de indução operado por inversor de frequência



fonte: (LU, 2011)

Região de fluxo constante - é a primeira região de controle; nela, o fluxo mútuo é mantido em seu valor nominal (DECOTTIGNIES, 2005). O fluxo mútuo pode ser conservado constante controlando-se a relação (Volts/Hertz), exceto em baixas velocidades.

Alterada a velocidade da força magnetomotriz e do fluxo mútuo conservando-os constantes em suas amplitudes nominais, impede-se, assim, uma saturação do material. A amplitude da tensão do estator irá crescer proporcionalmente com a frequência até o seu valor nominal.

A corrente solicitada pelo motor e o conjugado fornecido pelo motor será constante na condição do fluxo mútuo e da frequência de escorregamento serem mantidas constantes. Para um valor de conjugado nominal, o valor da frequência de escorregamento também será nominal; portanto, a corrente rotórica terá o seu valor nominal (PIRES, 2006).

A velocidade nominal de um trem é a velocidade na qual o motor aproxima-se de sua potência nominal, a partir da qual a tensão no estator se conserva constante em seu valor nominal. Esta velocidade se estabelece entre 30 e 80% da velocidade máxima, dependendo do tipo e do desempenho exigidos do trem (DECOTTIGNIES, 2005).

Região de potência constante - nesta região é aumentada a frequência além do seu valor nominal; em tal condição a velocidade do motor também aumenta.

Mantendo-se a tensão constante no estator, o conjugado do motor irá cair por causa da diminuição do fluxo mútuo e a máquina irá operar com potência constante. O fluxo mútuo irá diminuir proporcionalmente com a frequência, assim como a corrente de magnetização I_m . Nota-se que esta região é análoga à regulagem de campo no controle de velocidade de um motor de corrente contínua e, devido a esta característica, foi possível utilizar motores de indução na tração de trens.

Região de potência reduzida - nesta região a tensão no estator é mantida constante em seu valor nominal. Aumentando-se a frequência, o fluxo irá cair proporcionalmente. O fluxo nesta região será tão reduzido que o conjugado do motor

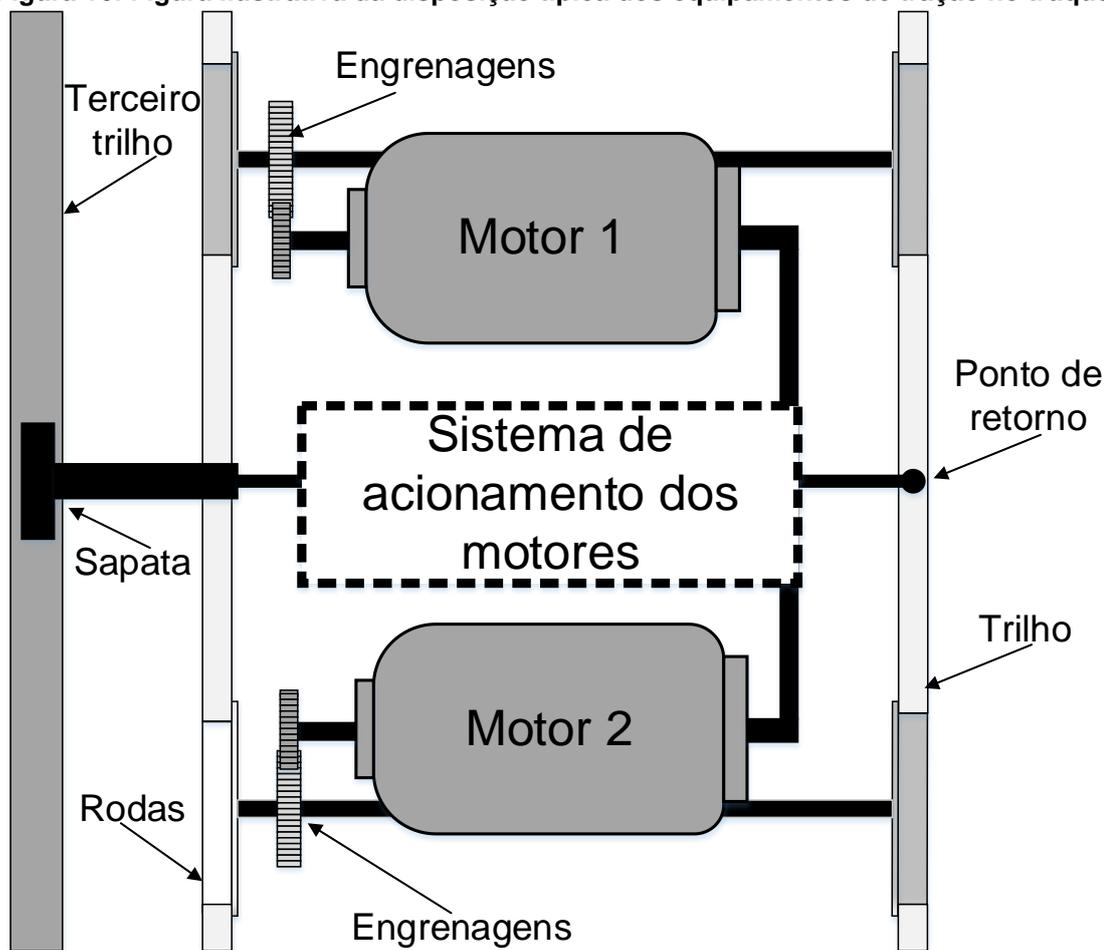
aproximar-se-á do conjugado máximo permitido pela máquina (MOHAN, et al., 2005).

De acordo com (DECOTTIGNIES, 2005), as amplitudes das correntes do estator chegam, então, a um valor inaceitável e a frequência das correntes no rotor atinge seu valor crítico. Por esta razão, a frequência de escorregamento é mantida constante nesta região de controle que vai até a velocidade máxima.

3.5.2. Conjunto dos equipamentos de tração

A Figura 16 mostra uma disposição típica dos equipamentos de tração no truque de um trem de um sistema de metrô.

Figura 16: Figura Ilustrativa da disposição típica dos equipamentos de tração no truque.

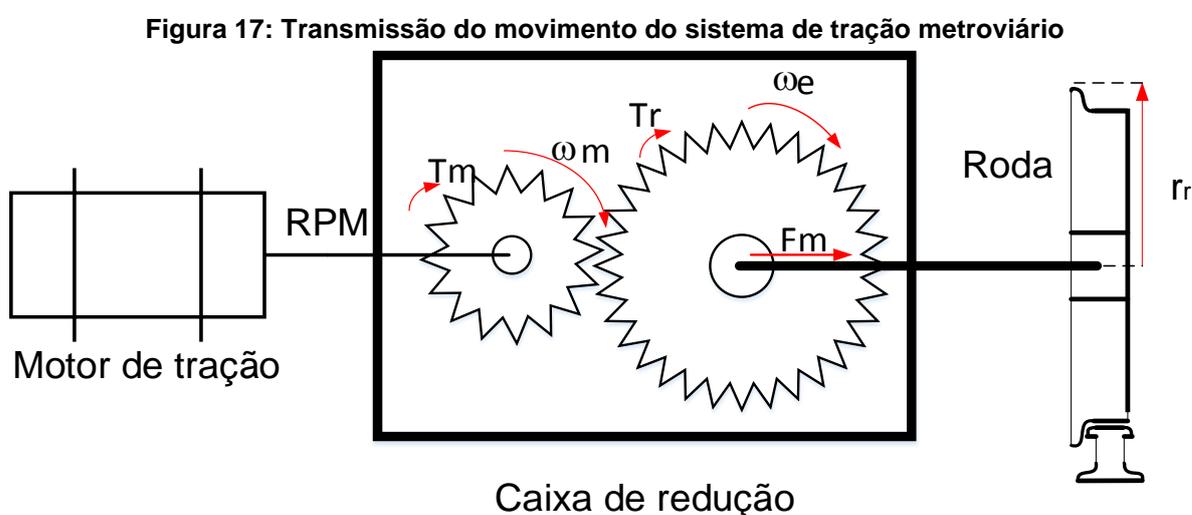


Fonte: Adaptado (HULL, 2009)

Também ilustra a disposição da sapata coletora de energia que desliza ao longo do terceiro trilho, a qual fornece energia para o sistema de acionamento dos motores; este, por sua vez, controla a operação dos motores de corrente alternada.

De modo geral, o motor de tração transmite seu torque e sua velocidade de rotação por meio de um sistema de redução para o eixo motorizado do truque e, conseqüentemente, para a roda do veículo.

A figura 17 ilustra a transmissão do movimento de um sistema de tração metroviário.



Fonte: (Autor)

Segundo (PIRES, 2006), este conjunto de engrenagens irá ter uma razão de transmissão igual à k_G e uma eficiência η_T , onde a relação de transmissão k_G é a relação entre velocidades de rotação de dois corpos, que transmitem movimento de um para o outro. A relação de redução k_G é determinada pela equação 07. Onde ω_e velocidade angular do eixo da roda do trem e ω_m é a velocidade angular do motor de tração.

$$k_G = \frac{\omega_m}{\omega_e} \quad (07)$$

A caixa de redução determina a relação entre velocidade ω_m angular do motor e velocidade linear "V" do trem em Km/h que é expressa pela equação 08.

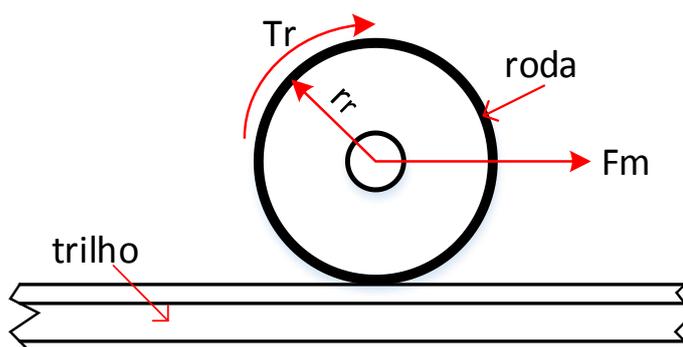
$$V = \frac{3,6 \cdot \omega_m \cdot r_r}{k_g} \quad (08)$$

Deste modo, considerando a razão de engrenagens k_G e o rendimento da transmissão η_T em sistemas metroviários, segundo Kaller e Allenbach (1995), o torque na roda pode ser expresso por meio do torque motor da seguinte maneira (KALLER & ALLENBACH, 1995):

$$T_r = T_m \cdot k_G \cdot \eta_T \quad (09)$$

O esforço motor (F_m) que é a força necessária para movimentar o trem depende do raio da roda do trem (r_r) e do torque da roda (T_r), conforme ilustrado na figura 18.

Figura 18: Esforços na roda de um trem.



Fonte: (Autor)

O esforço motor pode ser calculado pela equação 10.

$$F_m = \frac{T_r}{r_r} \quad (10)$$

Deste modo a potencia desenvolvida pelo motor de tração é dependente da velocidade do trem e do esforço motor, podendo ser expressa pela equação 11.

$$P_m = V \cdot F_m \quad (11)$$

De acordo com Decottignies (2005), em geral, o rendimento da caixa de engrenagens é quase igual a 0,98 (DECOTTIGNIES, 2005).

Dado um trem dotado de n_m motores, que esteja desenvolvendo um esforço motor F_m e supondo uma distribuição igual do esforço motor entre os n_m motores e todas as rodas com um mesmo diâmetro, pode-se calcular o esforço de tração “ E_t ” desenvolvido pelo conjunto de motores por meio da relação:

$$E_t = F_m \cdot n_m \quad (12)$$

3.5.2.1. Sistema de tração do trem da linha 4 amarela

O motor de tração do trem da linha 4 amarela do metrô da cidade de São Paulo é um motor de indução trifásico com quatro polos. Suas especificações técnicas estão na tabela 8.

Tabela 8: Especificação técnica do motor de tração

Tipos de veículos	Coefficiente λ
Potência	180Kw
Tensão nominal	1100V
Corrente nominal	119A
Frequência nominal	77Hz
RPM	2220
Eficiência	0,92
Rotação máxima de serviço	3848RPM
Peso	740kg
Relação de transmissão	7,07 (99/14)
Diâmetro da roda	780mm
Torque na frequência nominal	774Nm

Fonte: (Autor)

Para verificação das características do motor de tração utilizado no trem do metrô da linha 4 amarela da cidade de São Paulo, foram realizados ensaios, na fábrica, em várias frequências, em que foram medidos, para cada valor de frequência:

- a) Tensão;
- b) Corrente;
- c) Torque.

A tabela 9 contém os resultados destes ensaios.

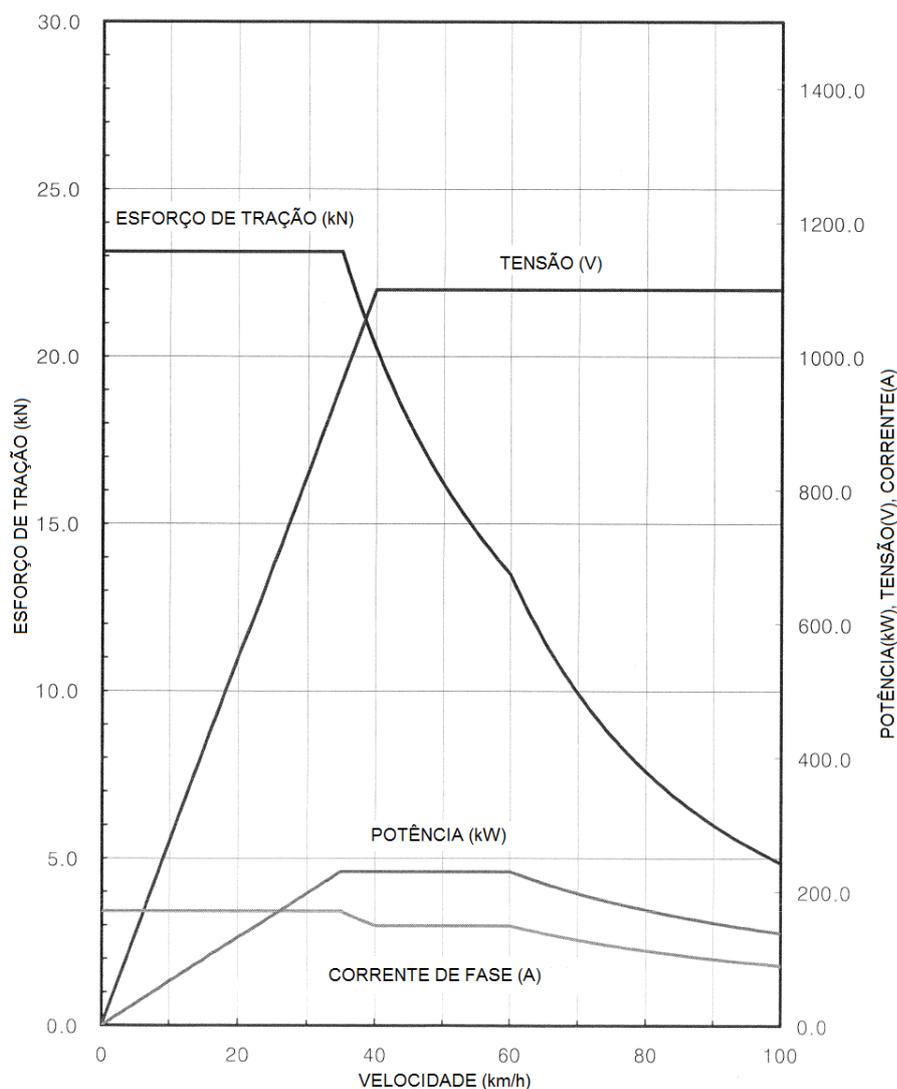
Tabela 9: Resultado do teste de carga do motor de tração

Tensão (V)	Corrente (A)	Frequência (Hz)	Valor de referencia do torque (Nm)	Limite inferior de torque (Nm)
963	185	55	1492	1417,4
1100	162	62	1305	1239,8
1100	119	75	774	735
1100	162	93	870	826,5
1100	135	111	605	574,8

Fonte: (Autor)

A figura 19 mostra a característica do esforço de um único motor utilizado no projeto do trem da linha 4 amarela do metrô de São Paulo. Os dados foram retirados do manual do fabricante do motor (ROTEM, 2008).

Figura 19: Característica do esforço em função da velocidade em tração e em frenagem.



Fonte: (ROTEM, 2008)

É possível reproduzir o gráfico das características do esforço de tração em função da velocidade mostrada na figura 25, aplicando as equações 01 a 05, conforme resultados mostrados nas colunas para cálculo de esforço de tração da tabela 10. Para determinação destes resultados são necessários os cálculos da:

- a) velocidade do motor em RPM, conforme a equação 05;
- b) potência do motor de tração, conforme equação 6 e dados da tabela 9;
- c) velocidade linear desenvolvida pelo conjunto do rodeiro, conforme equação 08.
- d) esforço de tração do motor conforme equação 11.
- e) torque do motor conforme equação 10.

Tabela 10: Resultado do teste de carga do motor de tração

RPM	Potência (kW)	Velocidade (km/h)	Esforço de tração do motor (kN)	Torque do motor (kN)
1585,71	241,30	32,98	26,34	1453,15
1787,53	241,37	37,17	23,37	1289,41
2162,34	177,30	44,97	14,19	782,99
2681,30	241,37	55,76	15,58	859,61
3200,26	201,14	66,55	10,88	600,18

Fonte: (Autor)

3.6. SISTEMA DE SINALIZAÇÃO METROVIÁRIA – BLOCO MÓVEL

A tecnologia para sistemas de sinalização baseados em bloco móvel era denominada, inicialmente, como “Moving Block System”; atualmente, é chamada de “CBTC - Communication Based Train Control”. No Brasil, foi utilizada pela primeira vez na linha 4 Amarela do Metrô de São Paulo, estando em operação desde 2012.

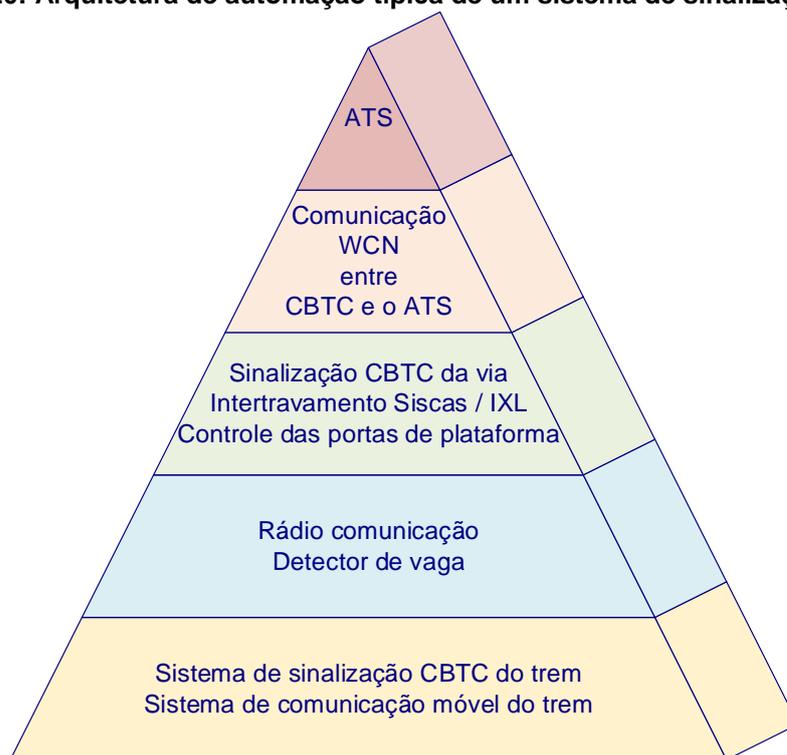
Para ilustrar a hierarquia da automação do sistema de sinalização CBTC foi desenvolvido, nesta tese, um modelo representativo baseado na pirâmide de

automação com diversos níveis hierárquicos. A Figura 20 ilustra um modelo de arquitetura de automação com cinco níveis, adaptado aos processos metroviários.

A estrutura do sistema CBTC está definida de acordo com a hierarquia do sistema a ser controlado: linha ou zona, partição topográfico CBTC ou trem, ou, de acordo com o ambiente a que CBTC está associado: por exemplo, Intertravamento (IXL), Supervisão Automática de Trens (ATS), de portas de plataforma (PSD).

A implementação desta tecnologia permite um controle mais efetivo do movimento do trem, por meio da comunicação contínua e bidirecional entre os equipamentos do veículo e os equipamentos de controle instalados ao longo da via; dessa forma, é possível permitir que os trens trafeguem nos limites de velocidade impostos pela via e com intervalos entre trens “headway” de 90 segundos.

Figura 20: Arquitetura de automação típica de um sistema de sinalização CBTC



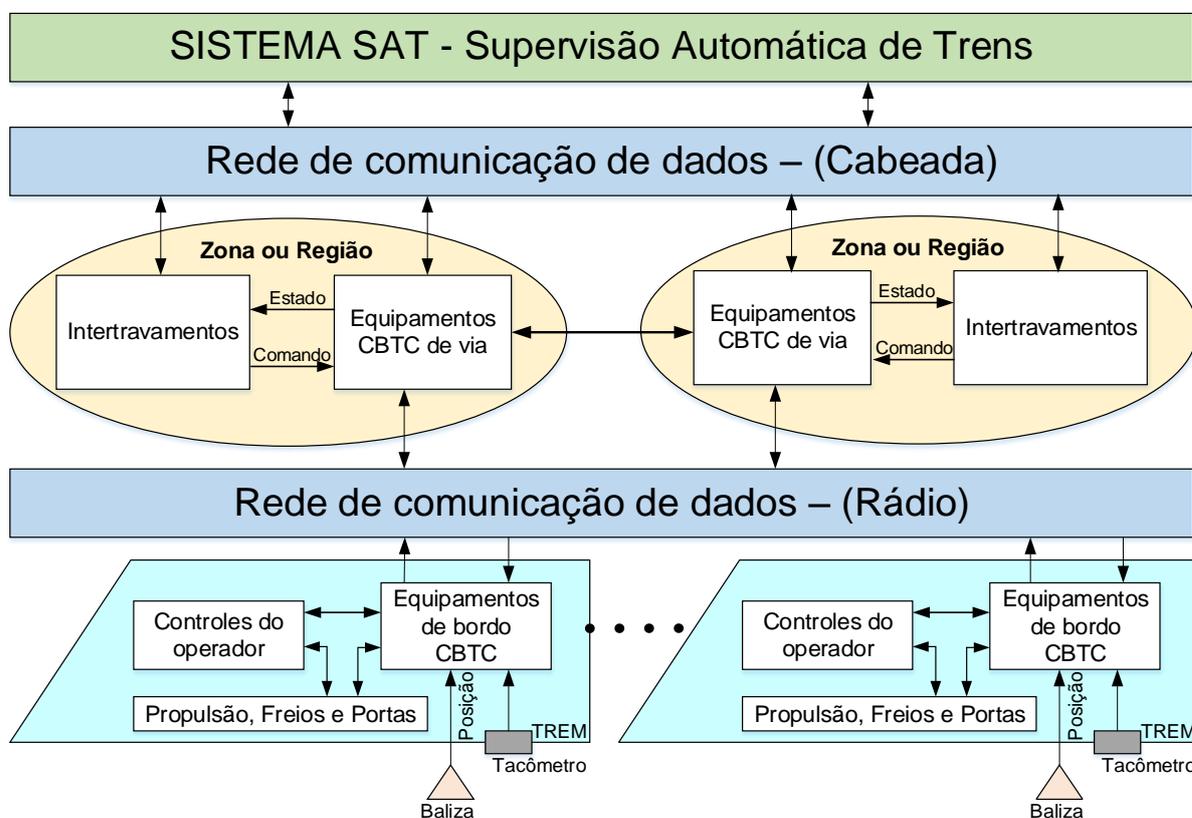
Fonte: (Autor)

Conforme ilustrado na figura 21, um sistema de sinalização com tecnologia CBTC utiliza, basicamente, os seguintes equipamentos:

- a) Rádios tipo “spread-spectrum” fixos e móveis, utilizados para comunicação contínua e bidirecional entre os equipamentos do trem e os equipamentos instalados ao longo da via;
- b) Balizas para localização ou aferição do posicionamento dos trens;
- c) Sistemas microprocessados para controle do tráfego de trens que são denominados Zonas de Controle (ZC);
- d) Antenas a bordo dos trens para a comunicação contínua e bidirecional trem – via.

Para orientação desta pesquisa, adotou-se o Modelo Funcional da IEEE 1474, em que, de forma didática, são apresentados, na forma diagrama, os principais elementos que compõem uma Arquitetura CBTC e os principais sinais trocados entre eles, conforme apresentado na figura 21.

Figura 21: Arquitetura Funcional Típica de um Sistema CBTC IEEE1474
Arquitetura Funcional Típica de um sistema CBTC IEEE1774



Fonte adaptada: (IEEE-1474.1, 2011)

Com o desenvolvimento de vários projetos de CBTC, o IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) decidiu criar um grupo de estudos para padronizar essa nova tecnologia. Como resultado desses estudos surgiram as normas (IEEE-1474.1, 2011), (IEEE-1474.2, 2003) e (IEEE-1474.3, 2008) desenvolvidas, especialmente, nas aplicações que utilizam o CBTC.

O CBTC é uma tecnologia baseada em um Sistema de Bloco Móvel, implementada por meio de uma rede sincronizada de comunicação via rádio, a qual pode rastrear os trens, determinando sua localização, velocidade e direção.

A localização e o Controle de Trens são baseados na comunicação via rádio digital com tecnologia de espalhamento espectral "Spread Spectrum". Os rádios são instalados ao longo da via, em intervalos de 405 m a 1620 m.

Periodicamente, cada trem comunica-se com o Computador de Estação (CBTC de Via). Cada Computador de Estação controla um trecho de via, denominado Zona de Controle.

A localização dos trens é realizada por meio dos rádios ao longo da via, que são instalados de forma a permitir que cada trem se comunique com, pelo menos, quatro Rádios de Via, dispostos a sua frente e atrás, durante sua viagem.

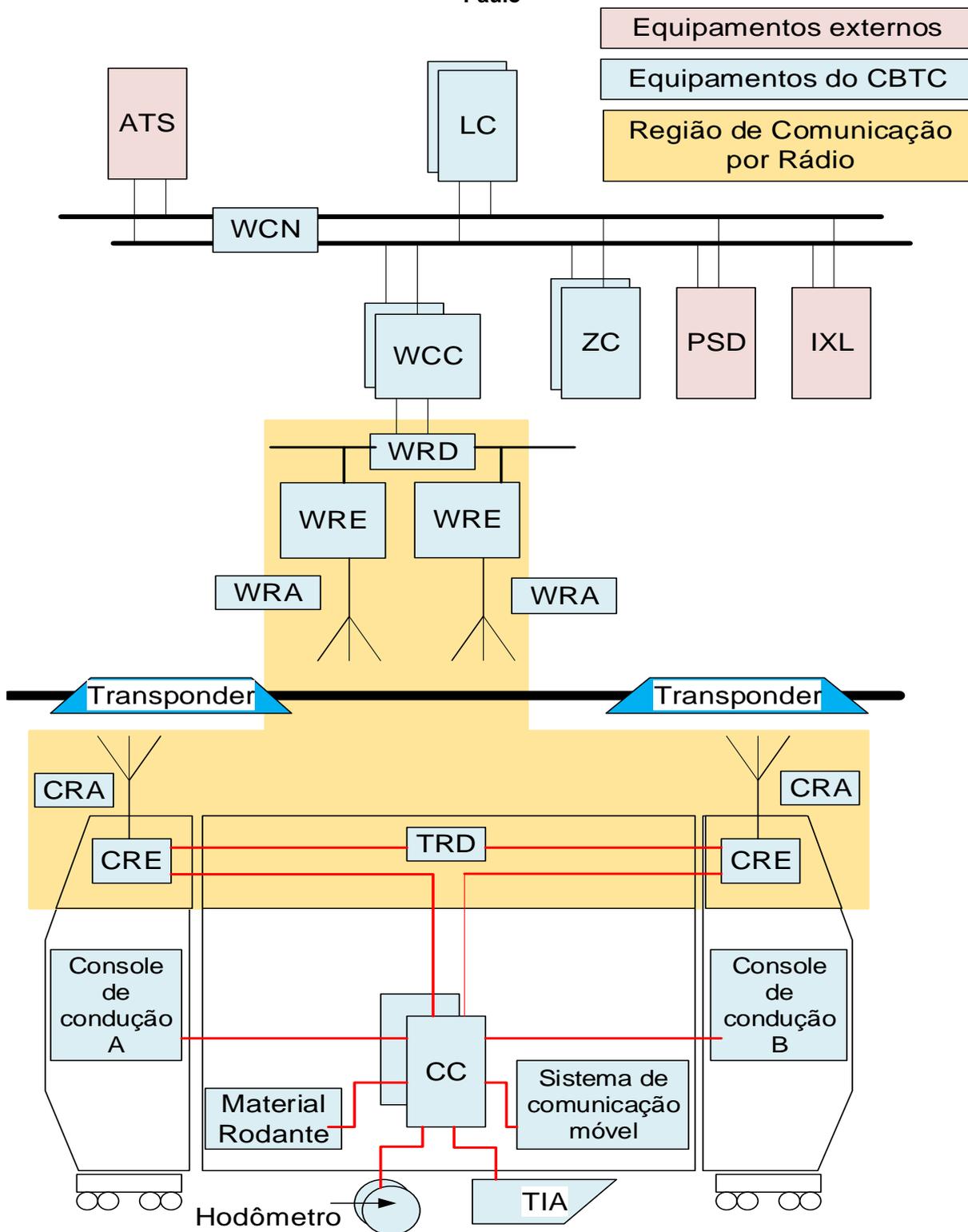
As informações recebidas pelos rádios de via são retransmitidas para o rádio da estação que, por sua vez, as retransmite ao computador da estação. A posição do trem é determinada pela posição que a baliza indica.

No CBTC existem, pelo menos, 4 caminhos de retorno da comunicação do trem para o computador de Estação, providos por meio dos rádios de via. Esta redundância de informação ocorre para garantia da segurança na determinação da posição do trem. Dentro de cada ZC - Zona de Controle, o computador da estação fica constantemente rastreando o trem e enviando-lhe os comandos de velocidade, aceleração e desaceleração.

Este sistema estabelece uma comunicação entre os computadores da estação, para permitir a continuidade operacional do sistema, além de criar zonas intermediárias entre as Zonas de Controle, a fim de realizar a passagem do controle de um trem de uma Zona para a outra.

A figura 22 mostra a Arquitetura de comunicação e os equipamentos que compõem o Sistema de sinalização CBTC da linha 4 amarela do metrô de São Paulo.

Figura 22: Arquitetura de comunicação do Sistema CBTC da linha 4 amarela do metrô de São Paulo



Fonte: (Autor)

Na Zona intermediária, que é caracterizada pela intersecção de duas Zonas de Controle, os trens comunicam-se com os Computadores de Estação de cada Zona de Controle, simultaneamente.

No sistema CBTC implementado na linha 4 do metrô da cidade de São Paulo foi empregada uma arquitetura de controle em que o controle dos trens é totalmente realizado pelos computadores instalados ao longo da via.

As funções dos computadores instalados ao longo da via são:

- a) Propiciar a lógica de controle da rede RF dos sistemas de Via;
- b) Estabelecer o desempenho dos trens e seu rastreamento;
- c) Calcular os comandos de velocidades, aceleração e desaceleração;
- d) Gerenciar a troca de controle do trem nas Zonas Intermediárias.

O Sistema de Rádio propicia a troca de dados entre os Rádios de Via e o Equipamento do Trem (CBTC de Bordo), de forma sincronizada.

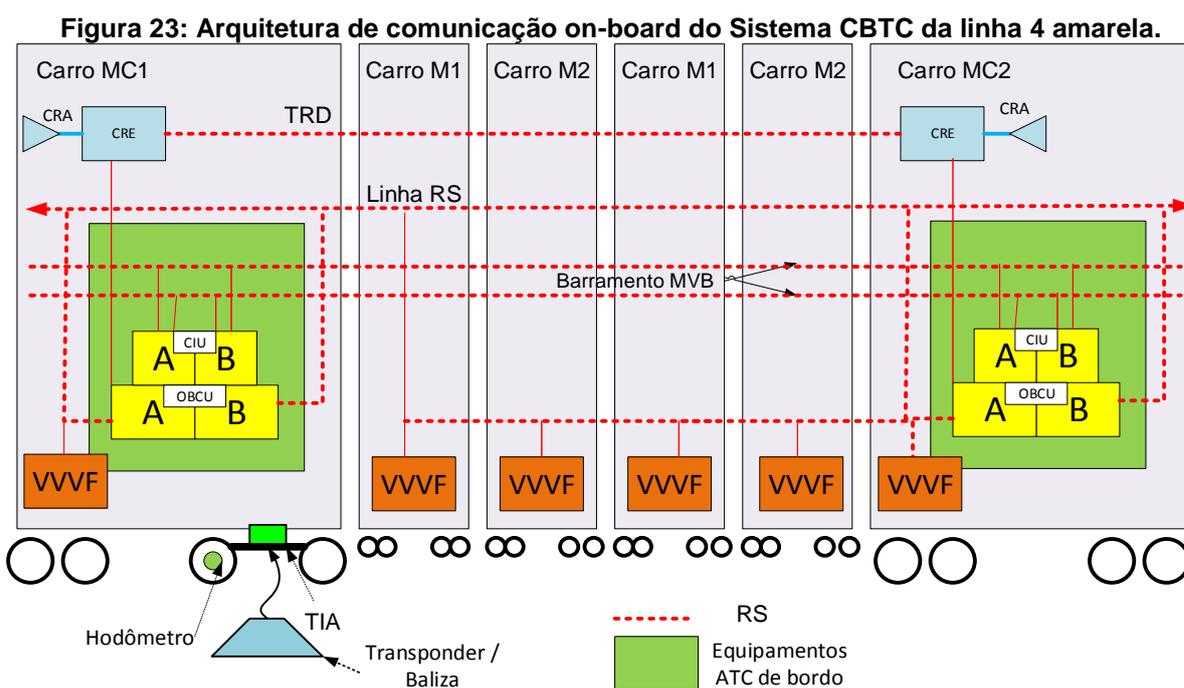
O Equipamento de Veículo (CBTC de Bordo) recebe todos os comandos de controle de velocidade do Computador de Estação e controla os equipamentos de propulsão, freio e portas do trem.

Os equipamentos que compõem a arquitetura de comunicação do Sistema CBTC da linha 4 amarela do metrô de São Paulo são:

- a) O sistema de Supervisão Automática de Trens, denominado ATS (Automatic Train Supervision);
- b) A Rede de Comunicação à margem da via denominada WCN (Wayside Communication Network): WCC (Wayside Cell Controller): Controlador de Célula à margem da via;
- c) O Controlador de zona denominado ZC (Zone Controller) - sua função é o controle dos trens dentro de uma região pré-determinada;

- d) O sistema de Intertravamento denominado IXL (Interlocking), cuja função é executar as lógicas de segurança que impeçam rota de colisão;
- e) O sistema de Porta de Plataforma denominado PSD (Platform Screen Door);
- f) O sistema de comunicação por rádio ao longo da via denominado WRD (Wayside Radio Antenna), tendo, como função, a comunicação entre os equipamentos do trem e os equipamentos da via;
- g) Os equipamentos de rádio instalados ao longo da via denominados WRE (Wayside Radio Equipment);
- h) As antenas de rádio de comunicação denominadas CRA (Carborne Radio Antenna);
- i) Os equipamentos de rádio de comunicação instalados no trem, denominados CRE (Carborne Radio Equipment);
- j) O controlador de bordo do trem denominado CC (Carborne Controller).

A figura 23 mostra a Arquitetura de comunicação e os equipamentos instalados no trem que compõem o sistema de sinalização CBTC da linha 4 amarela do metrô de São Paulo.



Fonte: (Autor)

Os equipamentos de via e de bordo do trem realizam funções distintas conforme os sinais são transmitidos. As principais funções são:

- a) O Trem, constantemente, envia para o CBTC de Via suas condições de estado (falhas, estado de portas etc.), velocidade, aceleração ou desaceleração;
- b) O Computador da estação rastreia o trem, calcula sua posição por meio de uma rede de rádio e balizas instaladas ao longo da via. Com base no mapa da via, transmite ao trem comandos de velocidade, aceleração e desaceleração;
- c) O equipamento CBTC de Bordo, de posse destas informações, executa os comandos estabelecidos pelo CBTC de Via.

Na linha 4 Amarela do metrô da cidade de São Paulo, o equipamento ATC de bordo encontra-se nos dois carros da extremidade. As partes principais são://////////

- a) A baliza é uma antena passiva - seu endereço está relacionado à posição física onde se encontra instalada, denominada de TIA: Transponder Interrogator Antenna de bordo;
- b) A unidade de controle de bordo - tem a função de controle do trem denominada de OBCU e é composta de duas unidades redundantes: A e B;
- c) A unidade de interface de comunicação, com a função de estabelecer a comunicação dos equipamentos do trem com os equipamentos da via denominada de CIU; é composta de duas unidades redundantes: A e B;
- d) Sistema de hodometria - é composto de dois hodômetros ou rodas fônicas.

4. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE ENERGIA DE TRAÇÃO METROVIÁRIA

4.1. INTRODUÇÃO

A simulação de marcha do trem nesta tese de doutorado tem, como objetivo, representar, da forma mais exata possível, a aplicação do algoritmo de controle do sistema de tráfego (desenvolvido durante a pesquisa), visando a otimização do consumo de energia elétrica.

O simulador realiza os cálculos do comportamento da composição em um determinado percurso, fornecendo o desempenho desta carga elétrica móvel, no transcorrer do sistema em diferentes configurações.

Assim, a simulação de tração é fundamental para determinar o desempenho do sistema de controle de tração dos trens do metrô proposto nesta tese. Na simulação estão incluídas as restrições ao desempenho do trem, que podem ser impostas:

- a) pelo sistema de sinalização;
- b) pelas características da via férrea;
- c) pelas características do equipamento de tração do trem.

As características do sistema de sinalização são importantes fatores na simulação do movimento de múltiplos trens, porque este sistema controla a interação entre os movimentos dos veículos em uma rota determinada (B. Mao, 2007).

De acordo com (MARTIN, 1999), a simulação do movimento dos trens pode ser aplicada:

- a) para avaliar o desempenho de tração de uma nova linha de metrô (HILLMANSEN & ROBERTS, 2006);
- b) para se verificar o desempenho de sistemas de sinalização metroviária (YU, et al., 2004);

- c) para avaliar propostas de novos diagramas horários dos trens (JIA, et al., 2008).

De acordo com (GOODMAN, et al., 1998) diferentes modelos matemáticos utilizados para simulação da circulação de trens foram desenvolvidos nas últimas décadas. Dentre eles destacam-se, pela sua grande aplicação nesta área:

- a) Modelos de simulação fundamentados no tempo decorrido;
- b) Modelos de simulação fundamentados na distância percorrida ;
- c) Modelos de simulação fundamentados em eventos ocorridos.

No modelo de simulação fundamentado no tempo, as variáveis referentes ao movimento do trem são atualizadas a cada intervalo de tempo. De acordo com (MAO, et al., 2007), para intervalos menores que 1 segundo pode-se assumir que a aceleração do trem é constante.

O modelo matemático baseado no tempo, em comparação com os outros métodos, resulta em valores mais precisos; porém, a complexidade computacional demandada limita a sua aplicação a áreas onde os detalhes de cada movimento ou o cálculo do consumo de energia são, definitivamente, necessários (LIU, et al., 2009).

O modelo de simulação baseado na distância é semelhante ao modelo já apresentado, porém com menor complexidade computacional; contudo, há limitações a sua aplicação, uma vez que necessita valores precisos de aceleração (LIU, et al., 2009).

Diferente das técnicas de modelagem baseadas no tempo e na distância, a modelagem baseada em eventos pode eliminar as simulações que não estão relacionadas ao objetivo da simulação, reduzindo o tempo de processamento. No modelo baseado em evento, o movimento do trem é representado por uma sequência de eventos pré-definidos, como a chegada e partida das estações (WONG & HO, 2004).

Nesta tese são utilizadas as técnicas de modelagem baseadas no tempo, devido a dois motivos:

- a) Em cada incremento de unidade de tempo são obtidos valores precisos de aceleração, utilizados para determinar com precisão a energia consumida no sistema de tração metroviário;
- b) O algoritmo de controle do tráfego de trens para otimização do consumo de energia utiliza, como variável de decisão, o tempo de parada na estação.

4.2. MODELO DE SIMULAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DE UMA LINHA METROVIÁRIA

O modelo de simulação do consumo energético de uma linha metroviária empregado nesta tese de doutorado é constituído de cinco macroetapas:

- a) entrada de dados da simulação;
- b) simulação da tração de um trem, para determinar os valores de aceleração, velocidade, potência mecânica, energia consumida e espaço percorrido;
- c) simulação do tráfego dos trens para determinar o posicionamento dos veículos ao longo do tempo;
- d) simulação da demanda energética de cada subestação retificadora, com base nos resultados obtidos na simulação da tração de um trem e do tráfego de vários veículos;
- e) saída dos resultados.

Observe-se que, para efeito de simplificação, o consumo energético obtido na simulação de tração de um trem foi estendido como pressuposto para todos os trens, sob a hipótese de que estivessem nas mesmas condições de carregamento.

A simulação do sistema de tração elétrica do sistema metroviário inclui as particularidades do movimento dos trens e o desempenho dos sistemas de fornecimento de energia, devido a sua solicitação em cada momento do período examinado.

De acordo com (PIRES, 2006), as principais informações da simulação são compostas:

- a) pela geometria da linha a ser estudada, como extensão da linha, inclinação e posição das rampas, raios e posição das curvas e posição das estações;
- b) pelas características do trem a ser simulado, como massa, tipo do acionamento, característica do esforço motor em função da velocidade;
- c) pelas particularidades operacionais da linha, como tempo médio de parada em cada estação e tempos de manobra nas estações inicial e final ;
- d) pelas particularidades do sistema de fornecimento de energia, como tensão, tipo de aterramento, localização das cabines de paralelismo, subestações retificadoras e tipo de condutores.

Na simulação, primeiramente, são carregados dados:

- a) do trem;
- b) da topografia da via metroviária;
- c) das características elétricas;
- d) das condições operacionais.

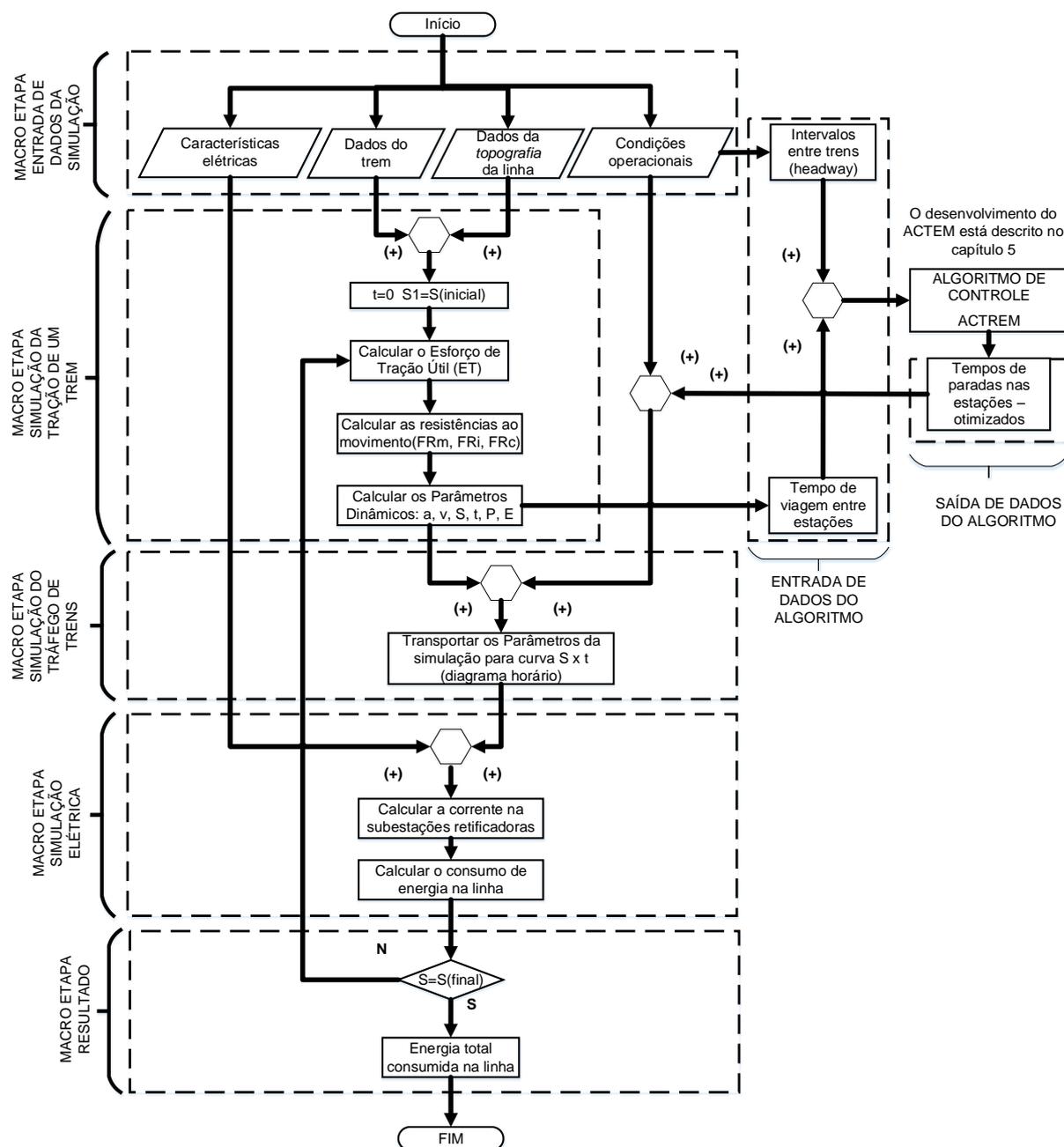
Com os dados do trem é feita uma simulação de sua tração na via para que sejam produzidos os resultados com as características elétricas e cinemáticas do movimento dos trens. Esta simulação permite conseguir a posição do trem e a sua potência elétrica consumida ao longo da linha.

Após a simulação da tração de um trem na via, com os dados das características operacionais da linha, é realizada uma simulação de tráfego para obter o diagrama horário que satisfaz à operação do sistema metroviário. O diagrama horário fornece, a cada instante, a posição e a potência elétrica consumida no sistema.

A parte final é a simulação elétrica que distribui as composições ao longo do sistema, de acordo com o diagrama horário, e calcula as correntes e tensões ao longo do sistema de alimentação, em cada instante. Este procedimento permite a obtenção da curva de carga das subestações que será utilizada para controle do tráfego de trens com vistas à redução do consumo de energia elétrica.

A Figura 24 mostra um fluxograma do processo de simulação empregado neste trabalho de pesquisa.

Figura 24: Fluxograma da simulação do sistema de tração elétrica



Fonte: (Autor)

4.3. DADOS DE ENTRADA DA SIMULAÇÃO

Esta primeira etapa fase é constituída de quatro sub etapas, executadas de forma independente.

- a) Entrada de dados das características elétricas. Nesta etapa o simulador é alimentado com os dados apresentados na tabela 11

Tabela 11: Relação dos dados das características elétricas

Dado	Descrição
V_{SER}	Tensão nominal da retificadora em Volts (V)
R_{SER}	Resistência interna da subestação em Ohm (Ω)
R_L	Resistência da linha de distribuição em Ohm's por quilômetro (Ω/km)
R_T	Resistência do trilho em Ohm's por quilômetro (Ω/km)

Fonte: (Autor)

- b) Entrada de dados do trem. Nesta etapa o simulador é alimentado com os dados apresentados na tabela 12

Tabela 12: Relação dos dados do trem

Dado	Descrição
V_{max}	Velocidade máxima (km/h)
V_T	Tensão nominal do trem (V)
P_{aux}	Potência dos sistemas auxiliares do trem (kW)
n_e	Número de eixos
n_{em}	Número de eixos motorizados
n_{me}	Número de motores por eixo
m	Massa total (t)
μ_0	Coefficiente de aderência:
r_e	Raio da roda (m)
k_G	Razão de transmissão
A_{ST}	Seção transversal (m^2)
P_{Tmax}	Potência máxima do motor na tração (kW)
P_{Fmax}	Potência máxima do motor na frenagem (kW)

Fonte: (Autor)

- c) Entrada de dados da topografia da via. Nesta etapa o simulador é alimentado com os dados apresentados na tabela 13

Tabela 13: Relação dos dados da topografia da via

Dado	Descrição
S_{est}	Posições das estações de passageiros
S_{SER}	Posições das subestações retificadoras
SC_{V1}	Posições de início das curvas na via 1
ρ_{V1}	Raios das curvas na via 1
SC_{V2}	Posições de início das curvas na via 2
ρ_{V2}	Raios das curvas na via 2
SR_{V1}	Posições de início das rampas na via 1
α_{V1}	Ângulos de inclinação das rampas na via 1
SR_{V2}	Posições de início das rampas na via 2
α_{V2}	Ângulos de inclinação das rampas na via 2
b	Bitola da via

Fonte: (Autor)

- d) Entrada de dados das condições operacionais. Nesta etapa o simulador é alimentado com os dados apresentados na tabela 14.

Tabela 14: Relação dos dados das condições operacionais

Dado	Descrição
h	Intervalo entre trens, denominado de headway.
t_{pa}	Tempo de porta aberta
t_{tc}	Tempo de duração do aviso de fechar porta
t_l	Tempo de liberação das portas
TX_{OC}	Taxa de ocupação de passageiros por metro quadrado
N_{AC}	Quantidade de assentos disponíveis para passageiros no trem
A_T	Área útil para transporte de passageiros em pé.

Fonte: (Autor)

4.4. MODELAGEM DINÂMICA DO MOVIMENTO DO TREM

Segundo (GUZZELLA & SCIARRETTA, 2007), a energia elétrica para o sistema de tração metroviária é utilizada para a aceleração do trem, para suprir as perdas de energia elétrica e mecânica e para movimentar a massa do trem para a frente contra as forças de atrito.

A equação básica do movimento é baseada na Segunda Lei de Newton:

$$m_{et} \cdot a_t = E_t - \sum (FR_m + FR_i + FR_c) \quad (13)$$

Onde:

- a) m_{et} é a massa efetiva do trem, incluído o momento de inércia. Este conceito é definido no item 4.4.1 deste trabalho de pesquisa;
- b) a_t é a aceleração atual desenvolvida pelo trem;
- c) E_t é o esforço de tração desenvolvido pelo conjunto de motores do trem, determinado conforme equação 06;
- d) FR_m é a força de resistência que se opõe ao movimento do trem. Este conceito é definido no item 4.4.3 deste trabalho de pesquisa;
- e) FR_i é a força despendida devido à inclinação da via; ela pode se opor ao movimento do trem ou não. Este conceito é definido no item 4.4.4.1 deste trabalho de pesquisa;
- f) FR_c é a força de resistência que se opõe ao movimento do trem, devido à curvatura da via. Este conceito é definido no item 4.4.4.2 deste trabalho de pesquisa.

4.4.1. Massa efetiva do trem

A massa efetiva do trem é o aumento do valor da sua massa devido ao momento de inércia dos componentes rotativos. Este aumento é dado por um coeficiente de inércia, determinado por meio de ensaios dinâmicos do trem.

O momento de inércia dos componentes rotativos do trem é levado em consideração a fim de calcular, adequadamente, a aceleração do trem. Isto é feito pela adição de um coeficiente de correção da massa do trem. Desta maneira, a massa do trem acrescentando a massa das cargas ou dos passageiros é expressa pela equação 14 (PIRES, 2006).

$$m_{et} = m_t \cdot (1 + \lambda) + m_u \quad (14)$$

Onde λ é o coeficiente de inércia dos componentes rotativos, m_t é o peso total do trem vazio e m_u , o peso total dos usuários do trem. Alternativamente, por razões de simplicidade a massa total do trem foi definida como a soma do peso do trem com o peso dos usuários, conforme equação 15 com impactos desprezíveis ao resultado final da simulação.

$$m = m_t + m_u. \quad (15)$$

Deste modo, a massa eficaz pode ser expressa por meio da equação 16 (LU, 2011).

$$m_{et} = m. (1 + \lambda) \quad (16)$$

O fator de inércia das massas girantes λ é uma constante adimensional, usualmente menor que 0,2, que depende da relação entre o número de eixos motorizados e o número total de eixos, da relação de engrenagem e do tipo de construção do trem (PIRES, 2006).

A tabela 15 mostra os valores do coeficiente de aderência λ para veículos de tração.

Tabela 15: Valores para o coeficiente λ_w

Tipos de veículos	Coeficiente λ
Locomotivas	0,15 – 0,30
Automotrizes	0,08 – 0,14
carros e vagões	0,02 – 0,04
carros vazios	0,05 – 0,12
trem completo	0,06 – 0,10

Fonte adaptada: (CABRITA, 2000)

4.4.2. Aderência do trem

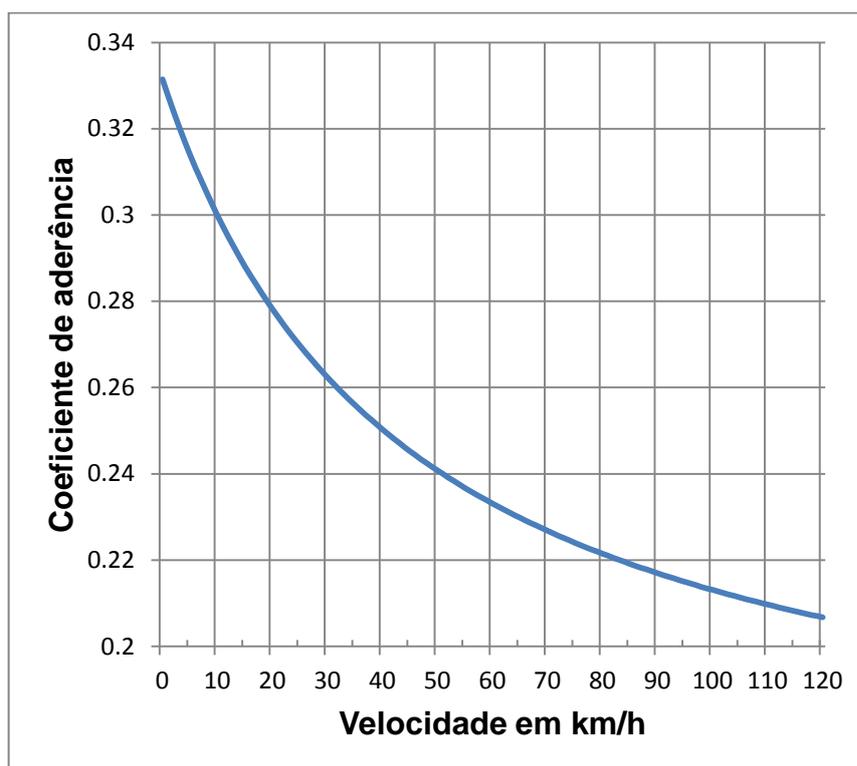
A aderência representa uma limitação do esforço de tração útil, que pode ser produzida pelas rodas do truque, ela deve ser considerada antes de estudar o esforço de tração real.

Assume-se que o coeficiente de aderência é uma variável dependente da velocidade do trem v_t , mas, na realidade, em altas velocidades, acima de 120km/h, existe algum decréscimo do coeficiente de aderência. De acordo com (PIRES, 2006) a curva média do coeficiente de aderência pode ser descrita pela equação 50. Em aplicações metroviárias, este valor está dentro da faixa de 0,161 a 0,33, dependendo das condições da via metroviária.

$$\mu(v_t) = \frac{7,5}{v_t + 44} + 0,161 \quad (17)$$

Observe-se que o valor inicial do coeficiente de aderência para uma velocidade de 0km/h é igual a 0,33. Para velocidades muito altas, o coeficiente de aderência assume, praticamente, o valor de 0,161, conforme ilustra a figura 25.

Figura 25: Curva do coeficiente de aderência em função da velocidade



Fonte: (Autor)

Entretanto, este valor tem apenas um caráter teórico, pois para velocidades muito altas, o coeficiente de aderência é completamente afetado pelas diferentes construções de trem e trilho (CURTIUS & KNIFFLER, 1950).

O coeficiente de aderência estabelece o esforço de tração máximo $E_{T_{max}}$ possível para manter a aderência das rodas do trem aos trilhos, considerando uma via metroviária plana, este valor é definido pela equação 18 que.

$$E_{T_{max}} = \mu \cdot m \cdot g \quad (18)$$

Na equação 17, $E_{T_{max}}$ é o máximo esforço de tração, μ é o coeficiente de aderência, m é a massa do veículo e g é a aceleração possível devido à gravidade.

Considerando os efeitos dos eixos motorizados na tração, a equação 19 pode ser reescrita, conforme a equação 48

$$E_{T_{max}} = \frac{n_{em}}{n_e} \mu \cdot m \cdot g \quad (19)$$

Onde n_{em} é o número de eixos motorizados do veículo e n_e é o número de eixos do veículo.

O estudo da análise de aderência realizado por (ZHANG, et al., 2002) determinou que:

- a) Para uma roda com superfície limpa e seca, o coeficiente de aderência μ não se altera com a velocidade do veículo;
- b) Para um trilho com superfície coberta por uma camada de óleo, o coeficiente de aderência μ pode cair para um nível muito baixo, que é mantido com o aumento da velocidade do veículo;
- c) Para presença de água na superfície de contato entre a roda e o trilho, o coeficiente de aderência μ reduz-se com o aumento da velocidade do veículo.

A fim de maximizar a força de tração total, é usual aumentar o número de eixos motorizados. Desta forma, a aceleração máxima em uma via pode ser calculado usando a equação 19, onde μ é o coeficiente de aderência.

$$a_{max} = g \cdot \frac{n_{em}}{n_e} \cdot \mu \quad (20)$$

4.4.3. Resistência ao movimento devido as características do trem - FR_m

Resistências normais são aquelas absolutamente inevitáveis, isto é, sempre ocorrem. As principais são devido a:

- a) Atrito nos mancais;
- b) Atrito de rolamento sobre a linha;
- c) Atrito do ar;
- d) Atritos do trem;
- e) Atritos provenientes das deformações da via permanente.

O cálculo de cada uma dessas resistências, em muitos casos, não é possível de ser feito devido à falta de informação;,, deste modo, de acordo com (ROCHARD & SCHMID, 2004) o coeficiente de resistência geral numa via nivelada pode ser calculada pela equação 21.

$$r = (A' + B'.v_t).m + C.v_t^2 + \frac{D}{r} = A'.m + B'.m.v_t + C.v_t^2 + \frac{D}{r} \quad (21)$$

Onde A' , B' , C e D são constantes empíricas relativas à resistência ao rolamento, resistência da via e resistência aerodinâmica, onde $\frac{D}{r}$ é a resistência devida à curvatura da via.

Nesta tese é utilizada a versão simplificada da equação 21, adotando $A = A'.m$ e $B = B'.m$. A curvatura de via representada pelo termo $\frac{D}{r}$ tem efeitos muito limitados quando o trem está rodando em velocidade menor do que 200km/h (LU, 2011). Assumido como sendo insignificante, o aumento da resistência devido à curvatura da via, o coeficiente de resistência ao movimento do trem pode ser calculado pela equação 22.

$$r = A + B.v_t + C.v_t^2 \quad (22)$$

Onde v é a velocidade do veículo em (m/s) e os coeficientes A (kN/t), B (kN/(km/h)/t) e C (kN/(km/h)²/t) são todos constantes, conhecidos como os coeficientes Davis onde:

- a) O coeficiente A refere-se às resistências do rolamento dos aros das rodas sobre os trilhos e o atrito nos mancais do eixo. Estas resistências são variáveis com o peso por eixo. De acordo com (PIRES, 2006) estas resistências podem ser consideradas constantes em relação à variação da velocidade.
- b) O coeficiente B refere-se às resistências provenientes do atrito do friso das rodas com os trilhos e ao atrito causado pelas oscilações e balanços. Estes são parâmetros relacionados à qualidade da via e estabilidade do veículo. Estas resistências são diretamente proporcionais à velocidade.
- c) O coeficiente C representa a parte aerodinâmica, ou seja, a resistência do ar que se torna presente principalmente sobre a face frontal do trem, agindo por atrito ao longo das paredes laterais e por aspiração na sua parte traseira. Este coeficiente é sensível a diversos fatores como forma frontal da composição, intervalo entre veículos e saliências na estrutura.

Convém notar que, apesar de um longo intervalo de tempo que separa o estudo de Davis desta tese, o primeiro estudo pode, perfeitamente, ser aplicado no caso dos sistemas metroviários, onde a faixa de velocidades está compreendida entre 0 a 100km/h, devido ao fato de que os materiais empregados são, ainda, do mesmo gênero que os do tempo de Davis.

A Tabela 16 apresenta os coeficientes A, B e C da equação 22 correspondentes às fórmulas de Davis para cada tipo de veículo (DAVIS JR, 1926) e (TOLEDO, et al., 1987)

Onde m_e é a massa do veículo por eixo (t), n_e é o número de eixos do veículo e seção S é a transversal do veículo (m²).

Tabela 16: Coeficientes A, B e C de Davis

Veículo	A [kN/t]	B [kN/(km/h)/t]	C [kN/(km/h) ² /t]
Locomotiva	$6,37432 \cdot 10^{-3} + 0,12896/m_e$	$91,39780 \cdot 10^{-6}$	$44,71883 \cdot 10^{-6} \cdot S/(n_e \cdot m_e)$
Carro	$6,37432 \cdot 10^{-3} + 0,12896/m_e$	$91,39780 \cdot 10^{-6}$	$6,33510 \cdot 10^{-6} \cdot S/(n_e \cdot m_e)$
Vagão	$6,37432 \cdot 10^{-3} + 0,12896/m_e$	$137,78343 \cdot 10^{-6}$	$9,26728 \cdot 10^{-6} \cdot S/(n_e \cdot m_e)$
Carro motor	$6,37432 \cdot 10^{-3} + 0,12896/m_e$	$274,58620 \cdot 10^{-6}$	$44,71883 \cdot 10^{-6} \cdot S/(n_e \cdot m_e)$
Carro reboque traseiro	$6,37432 \cdot 10^{-3} + 0,12896/m_e$	$137,78343 \cdot 10^{-6}$	$44,71883 \cdot 10^{-6} \cdot S/(n_e \cdot m_e)$
Carro reboque dianteiro	$6,37432 \cdot 10^{-3} + 0,12896/m_e$	$137,78343 \cdot 10^{-6}$	$6,32530 \cdot 10^{-6} \cdot S/(n_e \cdot m_e)$

fonte: (PIRES, 2006)

A variável m_e é determinada por meio da equação 23.

$$m_e = \frac{m}{n_e} \quad (23)$$

A FR_m é a força de resistência normal ao movimento de uma composição é dada por:

$$FR_m = r.m \quad (24)$$

Onde r é a resistência normal ao movimento do trem definidos pela equação 22 e m e a massa do trem em toneladas.

4.4.4. Resistências ao movimento devido as características da via

Resistências ao movimento devido as características da via são decorrentes, principalmente, devido a:

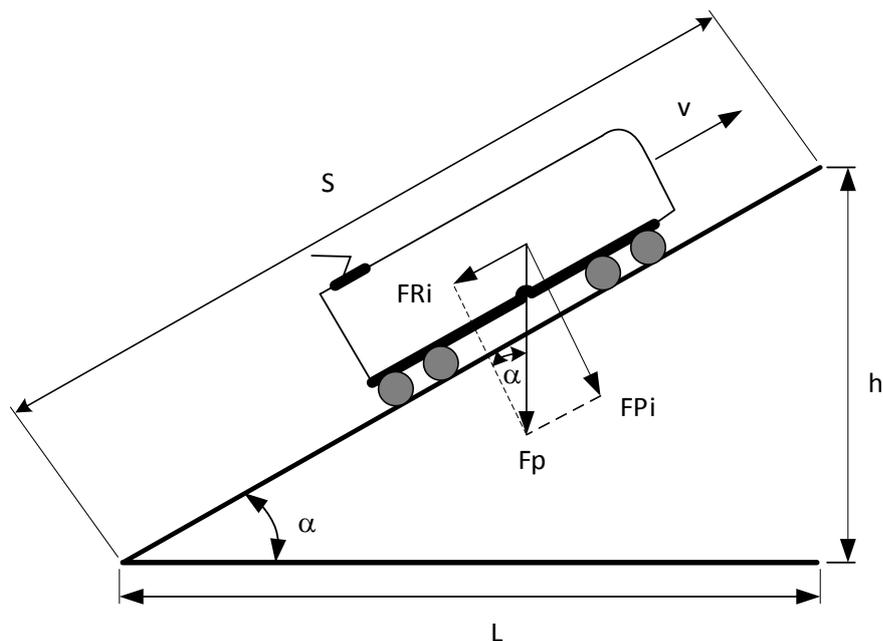
- a) Resistência de rampa;
- b) Resistência de curvatura.

4.4.4.1. Resistências ao movimento devido de rampa - FR_i

A resistência ao movimento devido a rampas e decorrente dos aclives e declives da via introduzem uma força decorrente da gravidade. No aclive, a força é contra o movimento do trem. No declive, a força é a favor do movimento do trem, constituindo um único caso de resistência negativa na simulação da tração do trem.

Um trem de massa m que se movimenta sobre uma via com ângulo de inclinação α apresenta no plano um peso definido por $m.g$. A força peso F_p nesta condição decompõe-se em duas forças, uma normal e outra tangencial à via, como mostra a figura 26.

Figura 26: Forças exercidas em veículo em uma rampa



Fonte: (Autor)

Para os valores de ângulos de inclinação empregados nas construções das vias de sistemas metroviários pode-se assumir que $L \cong S$. Segundo (TOLEDO, et al., 1987) isto é válido para rampas com inclinação de, até, 6° onde o $\text{sen} \alpha$ e $\text{tag} \alpha$ são iguais até a terceira casa decimal.

A ação que a gravidade exerce sobre a tração de uma composição de força peso F_p em uma rampa é representada pela força FR_i , que pode ser determinada por meio da equação 25.

$$FR_i = F_p \cdot \text{sen} \alpha = F_p \cdot \frac{h}{S} \quad (25)$$

Observe-se que a FP_i tem influência direta no atrito das rodas com os trilhos; portanto, tem influência direta no máximo esforço de tração. Este efeito está previsto na modelagem descrita no item 3.2.3 desta tese de doutorado.

Na figura 26 está representado, apenas, um carro da composição de uma linha genérica de metrô. Neste trabalho de pesquisa, para efeito de simplificação da modelagem, prevê-se que as rampas ou declives sejam suficientemente grandes para comportarem toda a composição metroviária. Assim, nesta modelagem, todos

os carros da composição do trem do metrô estão na mesma condição de influência. Observe-se que este condicionamento imposto na modelagem e simulação não diverge, significativamente, das características da linha 4 amarela do metrô de São Paulo, empregada como estudo de caso nesta tese.

4.4.4.1.1. Resistências devido à curvatura

São o resultado do escorregamento das rodas nos trilhos, devido aos deslocamentos diferentes das rodas que são solidárias e paralelas. O conjunto de eixos das rodas é montado em forma de um quadrilátero rígido, formando o que se chama de “truck”, o que torna maior a resistência ao movimento nas curvas

Para cálculo do coeficiente de resistência devido à curvatura, de acordo com Toledo (1987), a fórmula de Desdouits usada na equação 26 é a mais comum.

$$r_c = 500 \cdot \frac{b}{R} \text{ (KN/t)} \quad (26)$$

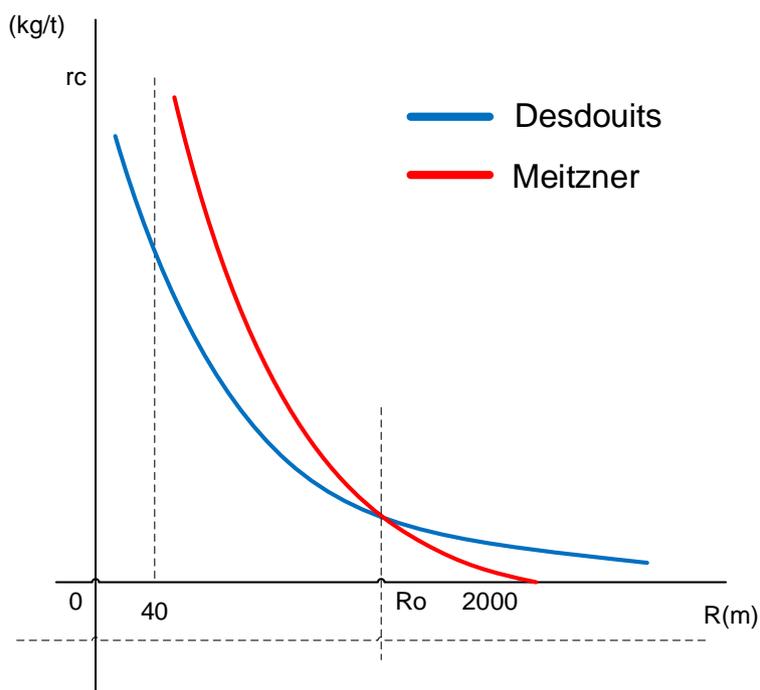
Onde r_c é o coeficiente de resistência devido à curvatura, b é a bitola do trilho em metros e R é o raio de curvatura da via em metros.

Outro método utilizado para cálculo do coeficiente de resistência de curvatura é a fórmula de Meitzner, em que, para qualquer bitola do trilho, a resistência devido à curvatura pode ser calculada pela equação 27.

$$r_c = \frac{800 - 0,4 \cdot R}{R - 40} \text{ (KN/t)} \quad (27)$$

Toledo (1987) comparou os dois métodos e designou um raio denominado R_o para definir qual deles usar; assim, para curvatura com raio $R < R_o$, o método de Meitzner é mais indicado, enquanto para curvaturas com raios $R > R_o$, o método de Desdouits é mais aconselhável. A figura 27 ilustra esta comparação entre os dois métodos para um dado valor de b .

Figura 27: Gráfico da comparação entre o método de Desdouits e Meitzner



Fonte: (PIRES, 2006)

Para as bitolas utilizadas nos sistemas metroviários e ferroviários brasileiros os valores de R_o são:

- a) Para $b=1\text{m}$, R_o será igual a 810m;
- b) Para $b=1,44\text{m}$, R_o será igual a 429m;
- c) Para $b=1,6\text{m}$, R_o será igual a 282m.

Para determinação da força de resistência ao movimento devida à curvatura, nesta pesquisa a bitola usada é a de 1,44 metros, devido ao fato de o objeto de estudo de caso apresentar as características da linha 4 Amarela do metrô de São Paulo. A FR_c , força de resistência ao movimento devida à curvatura da via, é determinada pela equação 28:

$$FR_c = r_c \cdot m \quad (28)$$

4.4.4.2. Aceleração instantânea do trem

A força mínima para movimentar um trem em um plano é definida pela equação de Newton.

$$F_t = m_{et} \cdot a_t \quad (29)$$

Podem-se decompor as forças exercidas no veículo em dois grupos: as forças produzidas pelo trem, positivas em tração e negativas em frenagem, e as forças que se opõem ao movimento deste trem. Assim, a equação anterior fica:

$$E_T - \sum R = m_{et} \cdot a_t \quad (30)$$

Detalhando as forças que se opõem ao movimento, a equação do movimento do trem pode ser escrita conforme mostra a equação 31:

$$m_{et} \cdot a_t = E_T - (FR_m + FR_i + FR_c) \quad (31)$$

Organizando a equação 31, se obtém a equação 32 para calcular a aceleração instantânea.

$$a_t = \frac{E_T}{m_{et}} - \frac{(FR_m + FR_i + FR_c)}{m_{et}} \quad (32)$$

Observe-se que a equação 62 somente é válida se E_T for menor ou igual a $E_{T(max)}$.

4.4.5. Estudo dos estados do trem

Nas simulações do movimento do trem realizadas nesta tese foi adotado que o veículo será representado por dois estados:

- a) Estado 1: expressa as condições atuais das variáveis físicas do trem, no instante (t) ;
- b) Estado 2: expressa as condições finais das variáveis físicas do trem, no instante $(t+\Delta t)$.

Para conseguir um nível de precisão no cálculo durante a simulação, considerando a aceleração constante, o intervalo de tempo ou de distância deve ser curto.

O intervalo de tempo adotado na simulação foi de 1 segundo, sendo que os resultados demonstraram uma excelente precisão para análise do consumo de energia.

Inicialmente, para se determinar o próximo estado do trem é necessário ser conhecido seu estado inicial e adotar-se que a aceleração imposta sobre ele é conhecida e constante, dentro de um determinado intervalo de tempo.

Considerando a aceleração instantânea como constante nos períodos de simulação, o estado 2, proveniente de um estado conhecido, é obtido. Devido à aceleração constante durante um período Δt de simulação, a velocidade será alterada de v_1 para v_2 e a distância de S_1 para S_2 .

Conhecendo o estado inicial do trem em cada etapa de simulação, uma aceleração instantânea "a" pode também ser conhecida aplicando a equação 59. Deste modo todos os estados ao longo do percurso são determinados na simulação.

A modelagem do movimento de um trem pode ser realizada de duas maneiras principais:

- a) A modelagem baseada no tempo;
- b) A modelagem com base na distância.

Na modelagem com base no tempo é considerada a aceleração constante dentro de um intervalo de tempo Δt ; o processo de obtenção do estado 2 é definido pelas equações 33 e 34. Neste caso, Δt é uma constante conhecida que define uma etapa de simulação.

$$v_2 = v_1 + a_t \cdot \Delta t \quad (33)$$

$$S_2 = S_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot a_t} \quad (34)$$

Na modelagem com base na distância é considerada a aceleração constante dentro de um intervalo de distância ΔS ; o processo de obtenção do estado 2 é definido pelas equações 65 e 66. Neste caso, ΔS é uma constante conhecida que define a etapa de simulação.

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta S} \quad (35)$$

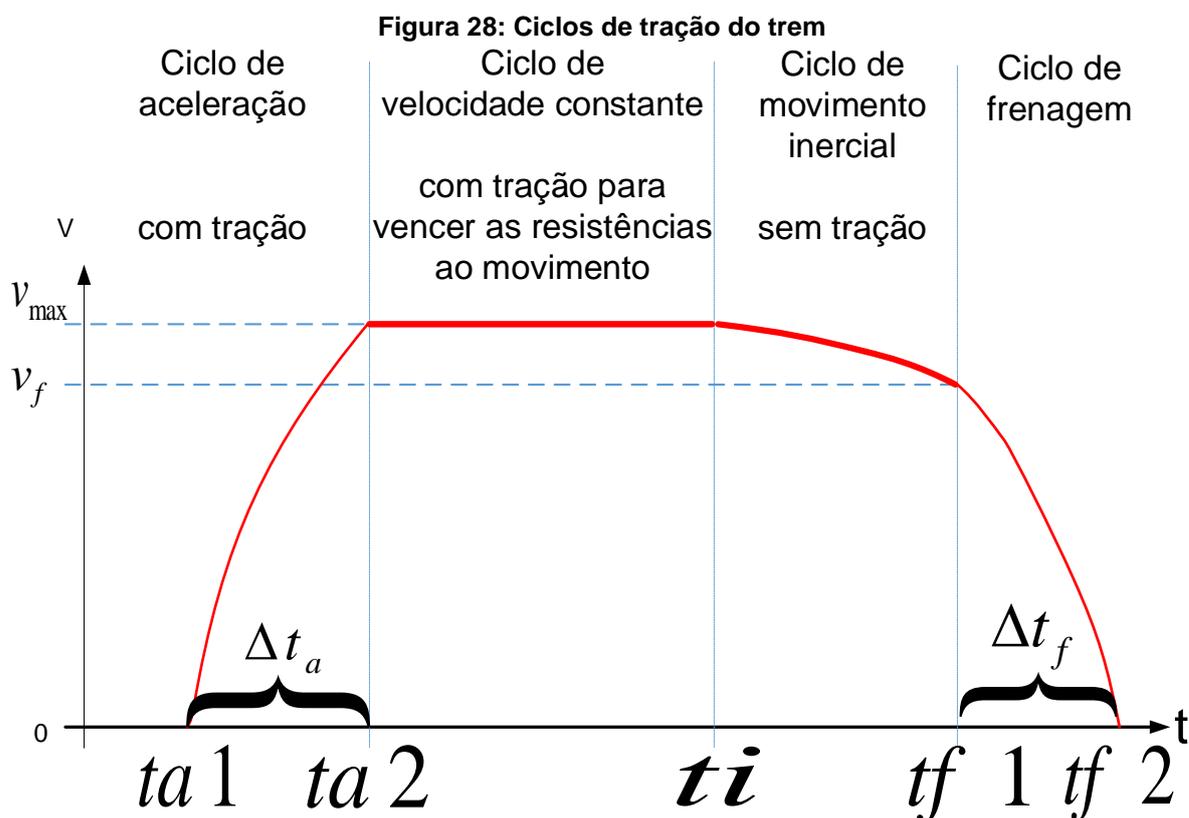
$$t_2 = t_1 + \frac{v_2 - v_1}{a} \quad (36)$$

4.4.6. Ciclos de tração do trem

O ciclo de tração de um trem em um sistema metroviário é caracterizado pela variação da velocidade em função do tempo ou do espaço quando o trem se movimenta entre duas estações. Nesta pesquisa são definidos quatro ciclos de tração do trem que são:

- a) **Ciclo de aceleração:** nesse intervalo, o esforço de tração do motor é constante e limitará a aceleração. A aceleração, por sua vez, é praticamente uniforme;
- b) **Ciclo de velocidade constante:** esse intervalo é caracterizado por uma velocidade constante que implica em uma aceleração nula; o esforço de tração do motor é suficiente para vencer as resistências ao movimento do trem;
- c) **Ciclo inercial:** durante este intervalo, os motores de tração são desligados e o movimento do trem é regido pela inércia e pelas resistências;
- d) **Ciclo de frenagem:** durante este intervalo, os motores são usados como geradores com um esforço constante.

A figura 28 ilustra os quatro ciclos de tração do trem.



Fonte: (Autor)

Na figura acima temos:

- a) $ta1$ - tempo do início do ciclo de aceleração;
- b) $ta2$ - tempo do final do ciclo de aceleração; denota o instante de mudança do ciclo de aceleração para o ciclo de velocidade constante;
- c) t_i - tempo do início do ciclo inercial; denota o instante da mudança do ciclo de velocidade constante para o ciclo inercial;
- d) $tf1$ - tempo do início do ciclo de frenagem; denota o instante de mudança do ciclo inercial para o ciclo de frenagem;
- e) $tf2$ - tempo do fim do ciclo de frenagem;
- f) v_r é a velocidade de regime;
- g) v_f - é a velocidade de frenagem.

Durante o ciclo de aceleração, a velocidade do trem aumenta até atingir a velocidade máxima permitida pelo sistema denominado v_{max} . Quando o trem atinge a velocidade máxima, inicia-se o ciclo da velocidade constante, em que a velocidade é mantida inalterável; nesta condição a aceleração será nula, ou seja, $a_t = 0$.

No ciclo inercial, os motores do trem são desligados. A aceleração é influenciada pela resistência ao movimento do trem e pelo efeito da gravidade. A aceleração de um trem na inércia é geralmente negativa; no entanto, pode tornar-se positiva se o veículo estiver se movimentando em uma descida íngreme.

Na simulação no ciclo inercial, como os motores são desligados, o $E_T = 0$; deste modo, para determinar a aceleração instantânea para cada estado utiliza-se um cálculo conforme mostra a equação 32.

O trem ingressa no ciclo de frenagem para atender os limites de velocidade impostos pela topologia da via ou para realizar a parada nas estações. Os requisitos de frenagem são determinados pelo sistema de sinalização para atender duas condições :

- a) Que a velocidade do trem permaneça, continuamente, abaixo do limite de velocidade imposto pela topografia da via;
- b) Que o trem pare corretamente na estação.

Nesta pesquisa, no ciclo de frenagem é adotada uma taxa constante de desaceleração do trem, denominada da_p ; seu valor, assumido nesta tese de doutorado, é $da_p = 0,98m/s^2$. Esta taxa foi adotada devido a ser a taxa de desaceleração utilizada no freio de serviço nos trens do metrô da cidade de São Paulo. O ciclo de frenagem nesta pesquisa é classificado em dois tipos:

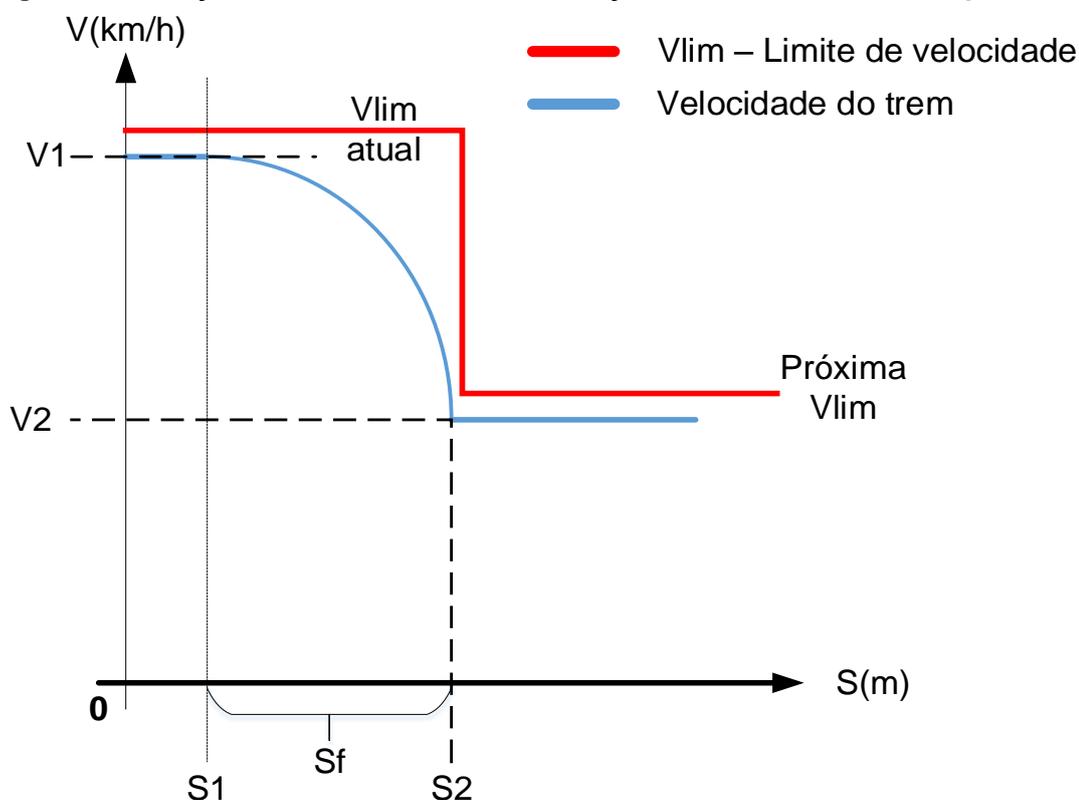
- a) tipo I: frenagem em função da redução do limite de velocidade imposto pela topografia da via;
- b) tipo II: frenagem devido à parada na estação.

Para a frenagem do tipo I, o espaço de frenagem S_f , necessário para alcançar o novo limite de velocidade, é determinado pela equação 37. A Figura 28 mostra um procedimento de redução de velocidade devido à redução do seu limite .

$$S_f = -\frac{v_{lim}^2 - v_1^2}{2 \cdot da_p} \quad (37)$$

Onde S_f é a distância crítica de parada, v_{lim} é o limite de velocidade imposta pela topologia da via; v_1 é a velocidade atual do trem; da_p é a desaceleração constante.

Figura 29: Redução de velocidade devido à redução do limite de velocidade permitido

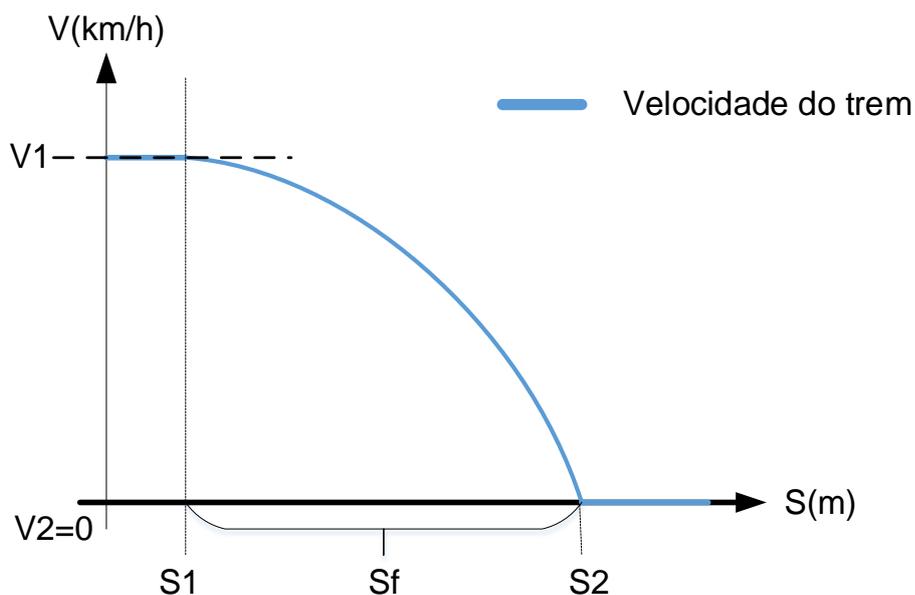


Fonte: (Autor)

Para a frenagem do tipo II, o espaço de frenagem S_f , necessário para o trem, com velocidade inicial v_1 parar corretamente na estação, é definido pela equação 38. A Figura 30 mostra um procedimento de redução de velocidade devido a uma parada da estação.

$$S_f = -\frac{v_1^2}{2 \cdot da_p} \quad (38)$$

Figura 30: Redução de velocidade devido a uma parada da estação



Fonte: (Autor)

4.4.7. Modelagem de consumo de energia

Para se determinar o consumo de energia, é necessário definir, a cada ciclo do trem, a sua aceleração instantânea, considerando o modo de controle da equação 67 e a determinação da aceleração por meio da equação 32.

Se a aceleração é constante, durante a alteração de velocidade de v_1 para v_2 como presume o modelo elaborado nesta pesquisa, a velocidade instantânea de cada distância a partir de S_1 para S_2 pode ser calculada pela Equação 39.

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 + 2 \cdot a \cdot \Delta S} \quad (39)$$

A partir da equação 39, onde ΔS é a separação entre as distâncias S_1 e S_2 , e sendo as velocidades v_1 e v_2 conhecidas, a aceleração pode ser obtida a partir da equação 40.

$$a_t = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot \Delta S} \quad (40)$$

Desta forma, como a variação da energia cinética é $m \cdot a_t \cdot \Delta S$, o consumo de energia do sistema de tração de um trem pode ser determinado por meio da equação 41.

$$E = \frac{m \cdot (v_2^2 - v_1^2)}{2} + \int_{v_1}^{v_2} FR_m dv + (FR_i + FR_c) \cdot \Delta S \quad (41)$$

Na equação 72, m é a massa total do veículo, v_1 é a velocidade do trem no passo atual de simulação e v_2 é a velocidade do trem no próximo passo de simulação.

4.5. MODELAGEM DO TRÁFEGO DE TRENS

Os tempos de parada dos trens nas estações são fundamentais na regulação de linhas de Metrô e no estabelecimento e cumprimento do intervalo programado entre trens. Esse intervalo entre trens é a variável fundamental na determinação da capacidade de transporte de uma linha de metrô e, por consequência, no nível de serviço oferecido aos seus passageiros.

O tempo de parada e o intervalo entre trens compõem um binômio conforto versus rapidez. O elemento mais complexo no dimensionamento de uma oferta de transporte é encontrar o ponto de equilíbrio desse binômio.

O tempo de parada na estação é formado pela soma de três parcelas:

- a) tempo de portas abertas do trem para o fluxo de embarque e desembarque de passageiros, definido como t_{pa} ;
- b) tempo de toque da campainha para fechamento das portas e tempo relativo à atuação, definido como t_{tc} ;
- c) tempo de reação dos equipamentos desde o toque da campainha até a liberação de freios e movimentação do trem, definido como t_l .

O tempo total de parada na estação tp é definido pela equação 42.

$$tp = t_{pa} + t_{tc} + t_l \quad (42)$$

O tempo de parada nas estações é também uma das principais variáveis para o estabelecimento e cumprimento do intervalo programado entre trens. A soma de todos os tempos de parada com os tempos de percurso é o que determina o tempo de ciclo em uma linha de metrô. Esse tempo de ciclo, dividido pelo número de trens, resulta no intervalo entre trens de uma linha.

A frequência dos trens em operação está relacionada com o intervalo entre trens e com o tamanho da frota efetiva necessária. Nesta tese, o intervalo médio de tempo entre trens será denominado de headway, pelo fato de ser um termo usual nas empresas de transporte de passageiros no Brasil.

A relação entre o headway, o número efetivo de trens em operação e o tempo de ciclo veicular é determinado pela equação 43. (PIRES, 2006).

$$h = \frac{t_v}{n_t} \quad (43)$$

Onde h headway, t_v tempo total de viagem definido na simulação do trem padrão e n_t número de trens.

A maior parcela e mais importante do tempo de parada é o tempo efetivo de portas abertas, necessário para o fluxo de embarque e desembarque dos passageiros.

De acordo com (SANTOS, 2013), no Metrô de São Paulo a parcela utilizada para o t_{pa} representa 65% do tempo total de parada e 14% do tempo total da viagem.

A capacidade de um trem de transporte de passageiros é dada pela sua área útil para pessoas em pé, multiplicada pela taxa de ocupação de passageiros por metro quadrado; para um nível de conforto, esta taxa deve ser inferior a 6 passageiros por metro quadrado, mais a quantidade de assentos disponíveis para os passageiros no trem, conforme a equação 44.

$$CPT = (TX_{oc} \cdot A_T) + N_{AC} \quad (44)$$

Onde:

- a) CPT é a capacidade de um trem de transporte de passageiros;

- b) TX_{oc} é a taxa de ocupação de passageiros por metro quadrado;
- c) N_{AC} é a quantidade de assentos disponíveis para os passageiros no trem;
- d) A_T é a área útil para transporte de passageiros em pé.

O número de trens que passa por um determinado ponto da linha no espaço de tempo de 1 hora, definido como NTH , é calculado pela relação 3600 segundos, dividido pelo intervalo entre trens em segundos, conforme equação 45.

$$NTH = \frac{3600}{h} \quad (45)$$

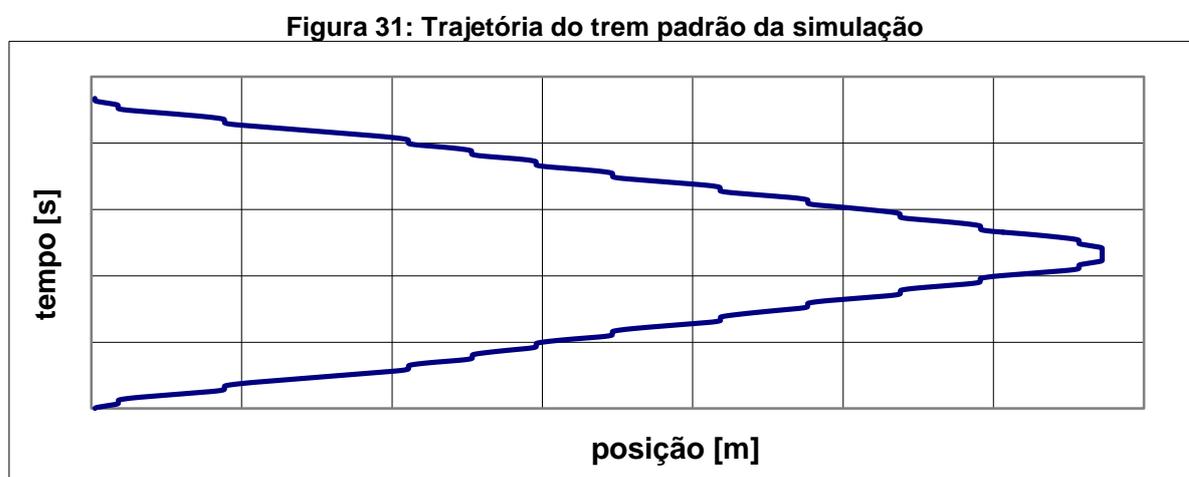
A capacidade de transporte de uma linha metroviária é determinada pela capacidade do trem, multiplicada pelo número de trens que passam em um determinado local da linha, em um determinado espaço de tempo, conforme equação 46.

$$NPL = CPT.NTH \quad (46)$$

Onde NPL é a capacidade de transporte da linha metroviária.

Uma representação gráfica do espaço percorrido pelo trem $S(t)$ no plano (s, t) é uma curva conhecida como trajetória do trem. As trajetórias fornecem uma síntese, completa e intuitiva do movimento do trem em uma dimensão. Trajetórias verdadeiras precisam apresentar um, e somente um S para cada t .

A figura 31 mostra a trajetória do trem padrão obtida por meio da simulação das equações 32, 33 e 34.

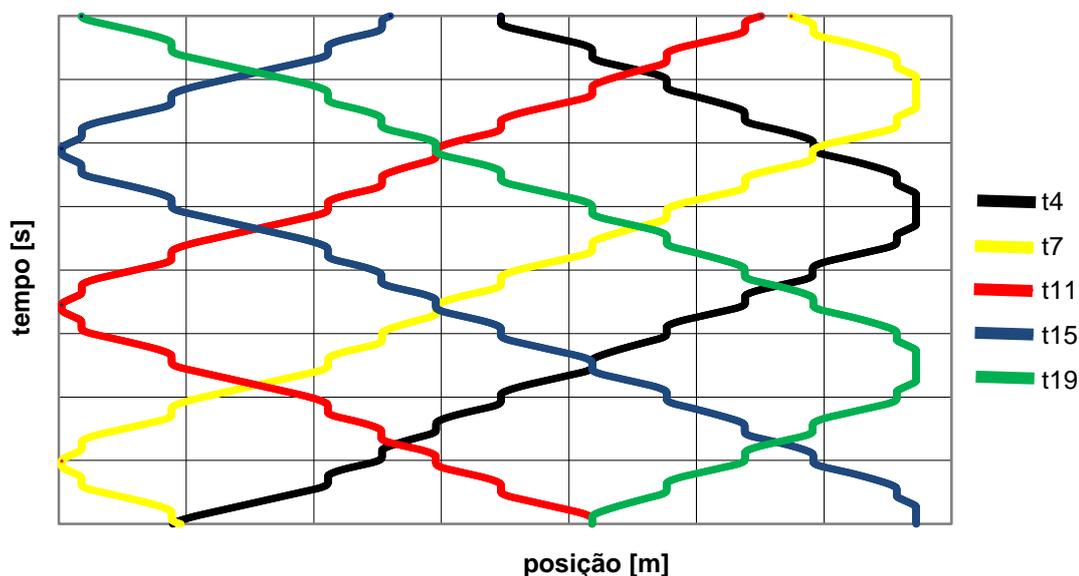


Fonte: (Autor)

A simulação de tráfego do sistema de tração elétrica fornece, a partir das trajetórias dos trens (que podem ser obtidas por meio da simulação da tração de um único trem, conforme descrito no item 3.3), a caracterização do seu movimento simultâneo na linha estudada, em função da demanda de tráfego prevista.

O movimento simultâneo de trens em uma via pode ser representado por meio de um conjunto de linhas, onde cada uma representa a trajetória de um trem. O eixo horizontal corresponde posição e o eixo vertical corresponde ao tempo de deslocamento. Nesta tese, este conjunto de linhas é denominado diagrama horário, conforme ilustra a figura 32.

Figura 32: Diagrama horário dos trens da linha 4.



Fonte: (Autor)

O diagrama horário completo envolve os trajetos efetuados pelos trens em operação em ambos os sentidos da linha. Neste trabalho de pesquisa foi considerado que todos os trens, circulando em um mesmo sentido, comportam-se de modo igual ao primeiro trem, considerado padrão da simulação; o mesmo ocorre com os trens circulando no sentido oposto. A distância das linhas paralelas, que pode ser constante, corresponde ao intervalo entre trens. As paradas nas estações são representadas por meio de linhas paralelas ao eixo do tempo.

É função do controle de tráfego dos trens regular a movimentação dos veículos necessários para atender à demanda de transporte de usuários. Esta demanda,

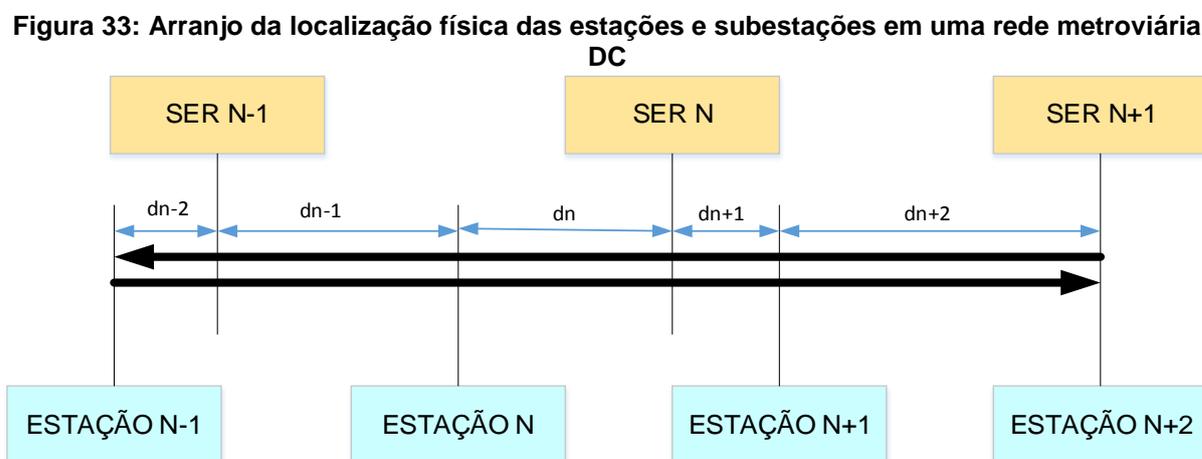
quando se trata de transportes de massa, depende da capacidade do sistema que, por sua vez, depende da capacidade e da frequência dos trens em operação.

4.6. MODELAGEM ELÉTRICA

Nesta pesquisa, o trem é considerado como uma fonte de corrente. Esta consideração é possível devido ao fato de o simulador calcular a corrente em cada ponto da via em todos os passos da simulação. Durante o ciclo de frenagem, o trem é um gerador e a corrente adotada é negativa; durante os ciclos de aceleração e de velocidade constante, o trem é um consumidor de energia e a corrente adotada é positiva.

A subestação retificadora não permite que a corrente retorne para o sistema de fornecimento de energia da concessionária. A subestação retificadora é considerada como uma fonte de tensão constante. O valor da tensão de saída da subestação retificadora adotado nesta tese é de 1580Vcc, devido às características técnicas da linha em estudo.

A figura 33 mostra a localização física do arranjo das estações e subestações em uma rede típica de distribuição de energia em DC. Note-se que o percurso consiste de dois trilhos paralelos.



Fonte: (Autor)

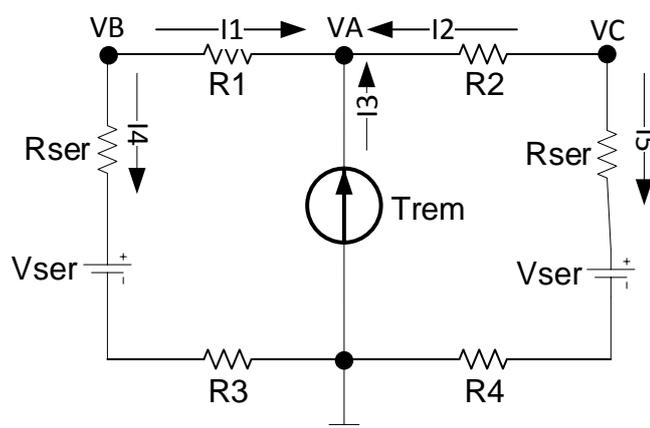
As variáveis d_{n-2} , d_{n-1} , d_n , d_{n+1} e d_{n+2} são as distâncias entre as estações e as subestações retificadoras.

Nesta tese de doutorado, para a determinação da energia consumida em cada subestação retificadora, será considerado que, apenas as subestações adjacentes à posição do trem fornecerão energia.

Para simplificação do modelo não foram consideradas as resistências de fuga do trilho para o terra. O diagrama mostrado na figura 40 representa uma rede elétrica DC típica, com um trem em movimento.

A rede de distribuição de energia para a tração do sistema metroviário da cidade de São Paulo é realizada em corrente contínua, todas as vias de alimentação são consideradas como resistivas. Uma rede simplificada é mostrada na figura 34.

Figura 34: Diagrama simplificado da rede elétrica metroviária em DC



Fonte: (Autor)

As variáveis da figura 34 são:

- R_{ser} é a resistência interna da subestação - neste trabalho de pesquisa é adotada como constante com valor de $0,02\Omega$, definido pelos ensaios realizados nas subestações da linha 4 amarela;
- R_1 e R_2 são as resistências de linha de alimentação positiva - no metrô da linha 4 amarela da cidade de São Paulo é utilizado o sistema de catenária, que tem uma resistência de $0,0133 \Omega/\text{km}$; são dependentes da localização do trem;

- c) R3 e R4 são as resistências de ambos os trilhos da via que estão em paralelo e têm uma resistência de $0,0188 \Omega / \text{km}$; são dependentes da localização do trem;
- d) V_{ser} é a tensão da subestação retificadora.

A análise de rede elétrica é um procedimento que produz um conjunto de equações para determinar as correntes e tensões em todos os nós da rede. O procedimento é baseado na lei de Kirchhoff. O método de nós é uma maneira de analisar uma rede elétrica DC. Neste estudo, ele é usado para analisar a rede elétrica.

Na Figura 34, utilizando a análise nodal, conclui-se que toda a corrente que vai para o nó A deve ser igual a zero, como mostrado na equação 47.

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (47)$$

Conseqüentemente

$$\frac{V_B - V_A}{R_1} + \frac{V_C - V_A}{R_2} + I_3 = 0 \quad (48)$$

Onde I_3 é a corrente do trem I_t e V_A é a tensão do trem V_t :

$$I_3 = I_t$$

$$V_A = V_t$$

Reescrevendo a equação 49.

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \cdot V_t + \left(-\frac{1}{R_1}\right) \cdot V_B + \left(-\frac{1}{R_2}\right) \cdot V_C = I_t \quad (49)$$

Na equação 80, os termos $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ são as autoadmitâncias do nó A e $-\frac{1}{R_1}$ e $-\frac{1}{R_2}$ é a admitância mútua entre o nó A e B e B e C, respectivamente. A corrente I_t é também chamada de corrente de injeção do nó A quando I_t é positivo, como mostra a figura 34.

A somatória de todas as correntes do nó B, a deve ser igual a zero, como mostrado na equação 50.

$$I_4 + I_1 = 0 \quad (50)$$

Conseqüentemente

$$\frac{V_B - V_{SER}}{R_3 + R_{SER}} + \frac{V_B - V_A}{R_1} = 0 \quad (51)$$

Reescrevendo a equação 52.

$$\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3 + R_{SER}}\right) \cdot V_B + \left(-\frac{1}{R_1}\right) \cdot V_A = \left(\frac{1}{R_3 + R_{SER}}\right) \cdot V_{SER} \quad (52)$$

A somatória de todas as corrente do nó C deve ser igual a zero, como mostrado na equação 53.

$$I_5 + I_2 = 0 \quad (53)$$

Conseqüentemente

$$\frac{V_C - V_{SER}}{R_4 + R_{SER}} + \frac{V_C - V_A}{R_2} = 0 \quad (54)$$

Reescrevendo a equação 55.

$$\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4 + R_{SER}}\right) \cdot V_C + \left(-\frac{1}{R_2}\right) \cdot V_A = \left(\frac{1}{R_4 + R_{SER}}\right) \cdot V_{SER} \quad (55)$$

O resultado é um sistema de três equações com três incógnitas. Na forma matricial, as equações 51, 52 e 53 podem ser escritas como:

$$\begin{vmatrix} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) & \left(-\frac{1}{R_1}\right) & \left(-\frac{1}{R_2}\right) \\ \left(-\frac{1}{R_1}\right) & \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3 + R_{SER}}\right) & 0 \\ \left(-\frac{1}{R_2}\right) & 0 & \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4 + R_{SER}}\right) \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_t \\ \left(\frac{1}{R_3 + R_{SER}}\right) \cdot V_{SER} \\ \left(\frac{1}{R_4 + R_{SER}}\right) \cdot V_{SER} \end{vmatrix} \quad (56)$$

Usando determinante, obtém-se V_A , V_B e V_C .

$$V_A = \frac{\begin{vmatrix} I_t & \left(-\frac{1}{R_1}\right) & \left(-\frac{1}{R_2}\right) \\ \left(\frac{1}{R_3 + R_{SER}}\right) \cdot V_{SER} & \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3 + R_{SER}}\right) & 0 \\ \left(\frac{1}{R_4 + R_{SER}}\right) \cdot V_{SER} & 0 & \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4 + R_{SER}}\right) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) & \left(-\frac{1}{R_1}\right) & \left(-\frac{1}{R_2}\right) \\ \left(-\frac{1}{R_1}\right) & \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3 + R_{SER}}\right) & 0 \\ \left(-\frac{1}{R_2}\right) & 0 & \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4 + R_{SER}}\right) \end{vmatrix}} \quad (57)$$

$$V_B = \frac{\begin{vmatrix} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) & I_t & \left(-\frac{1}{R_2}\right) \\ \left(-\frac{1}{R_1}\right) & \left(\frac{1}{R_3 + R_{SER}}\right) \cdot V_{SER} & 0 \\ \left(-\frac{1}{R_2}\right) & \left(\frac{1}{R_4 + R_{SER}}\right) \cdot V_{SER} & \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4 + R_{SER}}\right) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) & \left(-\frac{1}{R_1}\right) & \left(-\frac{1}{R_2}\right) \\ \left(-\frac{1}{R_1}\right) & \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3 + R_{SER}}\right) & 0 \\ \left(-\frac{1}{R_2}\right) & 0 & \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4 + R_{SER}}\right) \end{vmatrix}} \quad (58)$$

$$V_C = \frac{\begin{vmatrix} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) & \left(-\frac{1}{R_1}\right) & I_t \\ \left(-\frac{1}{R_1}\right) & \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3 + R_{SER}}\right) & \left(\frac{1}{R_3 + R_{SER}}\right) \cdot V_{SER} \\ \left(-\frac{1}{R_2}\right) & 0 & \left(\frac{1}{R_4 + R_{SER}}\right) \cdot V_{SER} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) & \left(-\frac{1}{R_1}\right) & \left(-\frac{1}{R_2}\right) \\ \left(-\frac{1}{R_1}\right) & \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3 + R_{SER}}\right) & 0 \\ \left(-\frac{1}{R_2}\right) & 0 & \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4 + R_{SER}}\right) \end{vmatrix}} \quad (59)$$

Aplicando as equações 53, 54 e 55 e usando o método de resolução de circuitos por sobreposição (onde cada trem e subestação retificadora tem seu efeito calculado individualmente), foi possível determinar a energia de frenagem regenerativa em cada subestação retificadora.

4.7. SIMULAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DA LINHA 4 – AMARELA DO METRÔ DE SÃO PAULO

Nesta tese de doutorado, como objeto de estudo, será utilizada a linha 4 amarela do metrô de São Paulo, para determinação do consumo de energia por meio da simulação do sistema de tração.

4.7.1. Dados do trem da linha 4 – Amarela

Neste trabalho de pesquisa foi realizada a simulação da tração de uma composição da linha 4 amarela do metrô da cidade de São Paulo, acionada por meio de inversores de tensão e motores de indução do tipo gaiola. A rede de alimentação é em 1580V corrente contínua.

Atualmente, a linha 4 amarela do metrô da cidade de São Paulo possui 14 trens fabricados entre 2008 e 2009, pela empresa coreana Hyundai Rotem. Suas características estão indicadas na tabela 17.

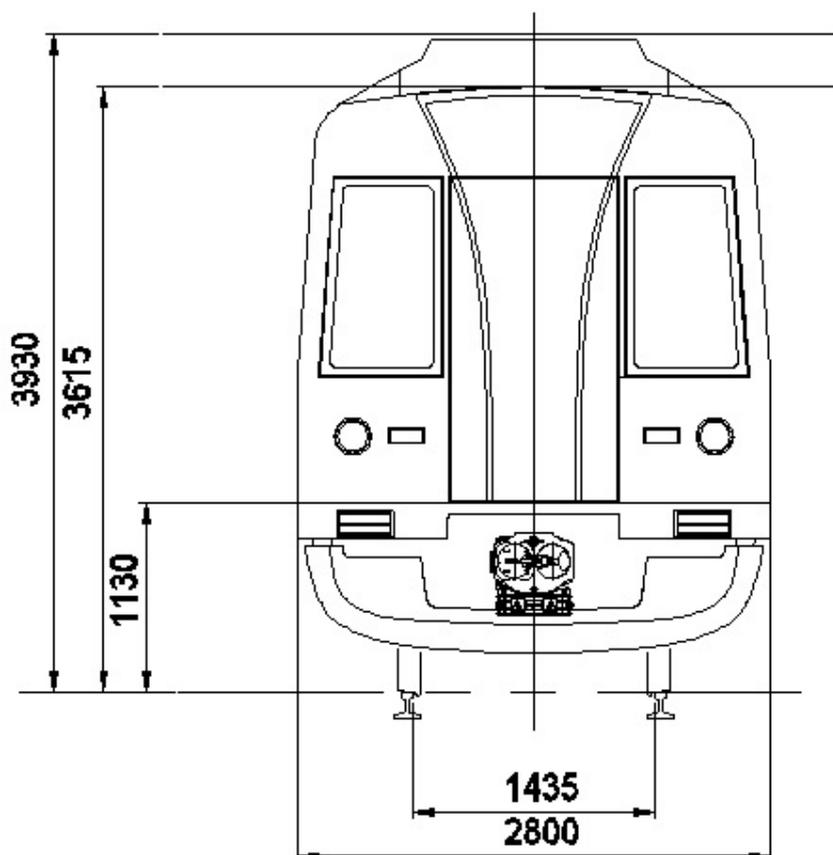
Tabela 17: Características do trem da linha 4

Característica	Valor
Velocidade máxima	80 km/h
Tensão nominal	1580Vcc
Corrente dos sistemas auxiliares	420A
Número de eixos	24
Massa total	382,16t
Coefficiente de aderência μ_0 :	0,25
Solavanco	1
Diâmetro da roda	0,78m
Razão de transmissão	7,07
Seção transversal	11,004 m ²
Esforço contínuo em tração	500KN
Esforço contínuo em frenagem	480 KN
Potência em tração	3472,222 W
Potência em frenagem	8666,667 W

Fonte: (Autor)

A seção transversal do trem, indicada na tabela 17, foi determinada utilizando as dimensões frontais do veículo da linha 4 amarela do metrô de São Paulo, mostradas na figura 35.

Figura 35: Mascara do trem da linha 4 amarela do metrô de São Paulo



Fonte: (ROTEM, 2008)

$$\text{seção transversal} = 3,93m \times 2,8m = 11,004m^2$$

A determinação da seção transversal do trem é necessária para determinação dos parâmetros de Davis, para ser possível determinar a resistência devido a aerodinâmica o trem.

4.7.2. Dados da topografia da via da linha 4 – Amarela

Para simulação dos cenários foram utilizadas as características técnicas da linha 4 amarela de metrô da cidade de São Paulo. Esta linha possui 11 estações de passageiros cujas localizações estão indicadas na tabela 18.

Tabela 18: Posição das estações de passageiros

Estação	Posição [m]
Cruzamento (linha 1 para linha 2)	2050
Vila Sônia	2356
Morumbi	3772
Butantã	6222
Pinheiros	7064
Faria Lima	7920
Fradique Coutinho	8932
Oscar Freire	10369
Paulista	11530
Higienópolis	12759
República	13829
Luz	15136
Cruzamento (linha 2 para linha 1)	15447

Fonte: (Autor)

As posições de início e o raio ρ das curvas da via 1da linha 4 amarela do metrô da cidade de São Paulo estão indicadas na tabela 19.

Tabela 19: Posição de início e o raio ρ das curvas da via 1.

1 – 20			21 – 40			41 – 60			61 - 81		
Nº	Posição [m]	ρ [m]	Nº	Posição [m]	ρ [m]	Nº	Posição [m]	ρ [m]	Nº	Posição [m]	ρ [m]
1	2050	0	21	7323	0	41	10281	4004	61	12901	2004
2	2893	1005	22	7501	704	42	10442	0	62	12950	0
3	3016	0	23	7926	0	43	10736	4000	63	13171	2450
4	3059	500	24	7985	450	44	10975	0	64	13225	0
5	3165	0	25	8069	0	45	11011	504	65	13261	2454
6	3372	504	26	8114	1000	46	11210	0	66	13327	0
7	3543	0	27	8255	0	47	11241	350	67	13359	400
8	4049	504	28	8311	400	48	11444	0	68	13601	0
9	4209	0	29	8479	0	49	11599	600	69	13705	2000
10	4284	400	30	8533	1000	50	11619	0	70	13878	0
11	4414	0	31	8665	0	51	11654	600	71	13896	300
12	4922	400	32	8821	3000	52	11694	0	72	14051	0
13	5162	0	33	8836	0	53	11803	808	73	14083	700
14	5249	700	34	8851	3000	54	11863	0	74	14252	0
15	5573	0	35	8866	0	55	11983	600	75	14347	804
16	5699	704	36	9266	504	56	12049	0	76	14509	0
17	5928	0	37	9477	800	57	12337	2500	77	14539	400
18	5978	1004	38	9920	0	58	12477	0	78	14792	0
19	6349	0	39	9961	1004	59	12537	2004	79	15021	804
20	6586	1004	40	10111	0	60	12852	804	80	15246	0
									81	15447	0

Fonte: (Autor)

As posições iniciais dos gradientes e a inclinação da via 1 da linha 4 amarela do metrô da cidade de São Paulo estão indicadas na tabela 20.

Tabela 20: Posições iniciais dos gradientes e a inclinação da via 1

1 – 10			11 – 20			21 – 30			31 – 40		
Nº	Posição [m]	α [%]	Nº	Posição [m]	α [%]	Nº	Posição [m]	α [%]	Nº	Posição [m]	α [%]
1	2050	2	11	4665	-0,5	21	8851	0	31	12560	0
2	2260	0	12	5240	0	22	9016	0,8	32	12772	-1,7
3	2532	-2,1	13	5405	0,5	23	9529	0	33	13744	0
4	2617	-4	14	5800	-0,5	24	9724	3,7	34	13968	-3,9
5	2991	4	15	6156	0	25	10273	0	35	14318	0
6	3125	-4	16	6308	-0,8	26	10468	3,7	36	14520	-3,2
7	3368	-0,5	17	6978	0	27	11421	0	37	15020	0
8	3692	0	18	7164	3,2	28	11612	-1,4	38	15220	-0,9
9	3838	0,5	19	7808	0	29	11724	-2,5	39	15447	-0,9
10	4200	-3,5	20	8000	0,9	30	12032	-3,8	40		

Fonte: (Autor)

As posições de início e o raio ρ das curvas da via 2 da linha 4 amarela do metrô da cidade de São Paulo estão indicadas na tabela 21.

Tabela 21: Posição de início e o raio ρ das curvas da via 2.

1 – 19			20 – 38			39 – 57			58 – 76		
Nº	Posição [m]	ρ [m]	Nº	Posição [m]	ρ [m]	Nº	Posição [m]	ρ [m]	Nº	Posição [m]	ρ [m]
1	2050	0	20	6585	1000	39	10974	0	58	13258	2450
2	2893	1005	21	7320	0	40	11010	500	59	13324	0
3	3016	0	22	7498	700	41	11208	0	60	13356	404
4	3062	500	23	7921	0	42	11239	354	61	13576	0
5	3168	0	24	7980	474	43	11443	0	62	13700	1000
6	3371	500	25	8110	0	44	11615	600	63	13884	0
7	3541	0	26	8251	1004	45	11636	0	64	13929	300
8	4048	500	27	8477	0	46	11803	800	65	14068	0
9	4206	0	28	8531	1004	47	11861	0	66	14097	704
10	4277	404	29	8663	0	48	12014	600	67	14250	0
11	4407	0	30	9264	500	49	12081	0	68	14345	800
12	4920	404	31	9443	0	50	12335	2504	69	14506	0
13	5160	0	32	9475	804	51	12475	0	70	14537	404
14	5216	704	33	9920	0	52	12535	2000	71	14791	0
15	5626	0	34	9960	1000	53	12849	800	72	15020	800
16	5658	700	35	10110	0	54	12898	2000	73	15244	0
17	5939	0	36	10280	4000	55	12947	0	74	15447	0
18	5979	1000	37	10441	0	56	13168	2454	75		
19	6348	0	38	10735	4004	57	13222	0	76		

Fonte: (Autor)

As posições iniciais dos gradientes e a inclinação da via 2 da linha 4 amarela do metrô da cidade de São Paulo estão indicadas na tabela 22.

Tabela 22: Posições iniciais dos gradientes e a inclinação da via 2

1 – 10			11 – 20			21 – 30			31 – 40		
Nº	Posição [m]	α [%]	Nº	Posição [m]	α [%]	Nº	Posição [m]	α [%]	Nº	Posição [m]	α [%]
1	2050	2	11	4665	-0,5	21	8849	0	31	12558	0
2	2260	0	12	5240	0	22	9012	0,8	32	12772	-1,7
3	2532	-2,1	13	5405	0,5	23	9526	0	33	13743	0
4	2617	-4	14	5800	-0,5	24	9720	3,7	34	13968	-3,9
5	2991	4	15	6156	0	25	10272	0	35	14316	0
6	3125	-4	16	6308	-0,8	26	10464	3,7	36	14520	-3,1
7	3368	-0,5	17	6976	0	27	11420	0	37	15019	0
8	3690	0	18	7164	3,2	28	11612	-1,4	38	15216	-1
9	3838	0,5	19	7803	0	29	11724	-2,5	39	15447	-1
10	4200	-3,5	20	7996	0,9	30	12032	-3,8	40		

Fonte: (Autor)

O metrô da linha 4 amarela da cidade de São Paulo tem sete subestações cujas localizações estão indicadas na tabela 23.

Tabela 23: Localização das subestações da linha 4

Subestação	Posição [m]
Pátio Vila Sônia	2671
Caxingui	4587
Pinheiros	7064
Fradique Coutinho	8932
Paulista	11530
República	13829
Luz	15136

Fonte: (Autor)

4.7.3. Simulação da tração de um único trem

Esta tese de doutorado apresenta a simulação do sistema de tração de uma composição utilizada na linha 4 amarela do metrô da cidade de São Paulo, cuja composição é acionada por meio de inversores de tensão e motores de indução do tipo gaiola. A rede de alimentação é em 1580 V corrente contínua.

Com os dados do trem da tabela 17, foi possível determinar os coeficientes A, B e C da fórmula de Davis para toda a composição. Aplicando a equação 52 e os coeficientes referentes a locomotiva da tabela 16 (devido às características podem ser usados em sistemas metroviários), tem-se:

$$\begin{cases} A = 6,3742 \cdot 10^{-3} + \frac{0,12896}{15,923} \\ B = 91,39786 \cdot 10^{-6} \\ C = 44,71883 \cdot 10^{-6} \frac{11,004}{382,16} \end{cases}$$

$$r = 0,0144731 + 91,39786 \cdot 10^{-6} \cdot v + 1,28764 \cdot 10^{-6} \cdot v^2 \quad [kN/t]$$

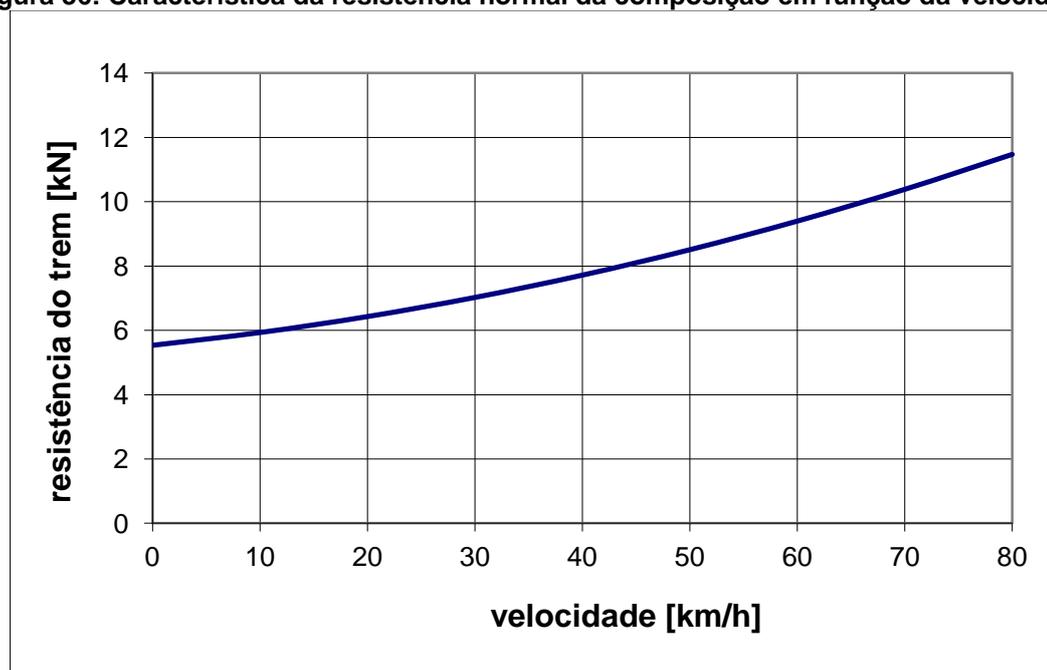
Aplicando a equação 33, tem-se:

$$FR_m = r * 382,16t$$

$$FR_m = 5,53105 + 0,0349286 \cdot v + 0,000492086 \cdot v^2 \quad [kN]$$

A característica da resistência normal ao movimento do trem da linha 4 amarela do metrô da cidade de São Paulo, em função da velocidade, é mostrada na figura 36.

Figura 36: Característica da resistência normal da composição em função da velocidade



Fonte: (Autor)

A massa média m do trem da linha 4 amarela é de 382,16 toneladas. Conforme a Tabela 11, um trem completo pode ter um coeficiente variando entre 0,06 e 0,10. Neste trabalho de pesquisa foi adotado o valor do coeficiente de aderência $\lambda = 0,06$, deste modo a massa efetiva do trem m_{et} tem seu valor dado pela equação 16:

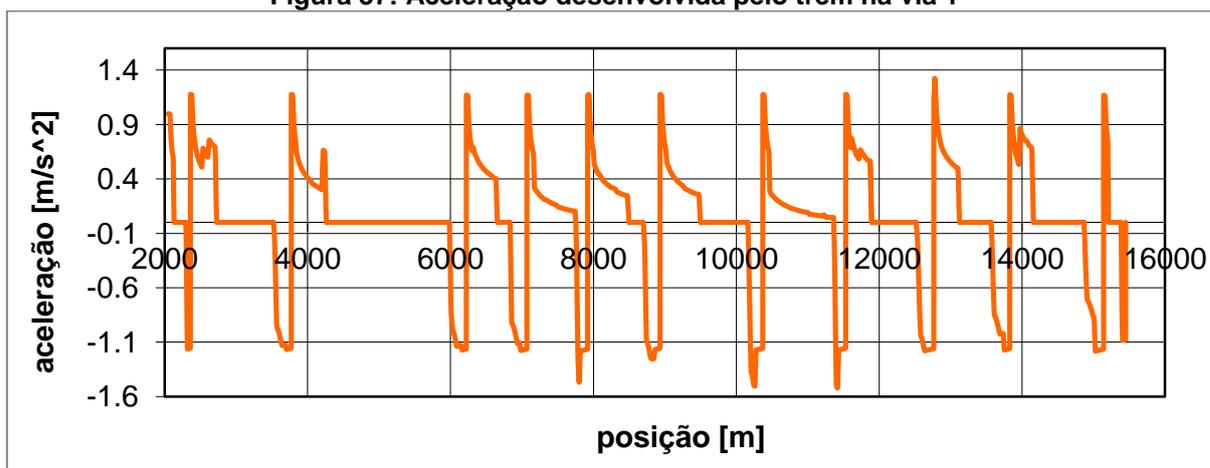
$$m_{et} = 382,16 \cdot (1 + 0,06) = 405,09 \text{ t}$$

A aceleração do trem é determinada pelos termos da equação 59 sobre a massa efetiva do trem determinada pela equação 46 e pelos dados da tabela 11. Onde o coeficiente de aderência determinado pela equação 50 limita o esforço de tração máximo é conforme descrito pela equação 48.

4.7.4. Resultados da simulação de um trem

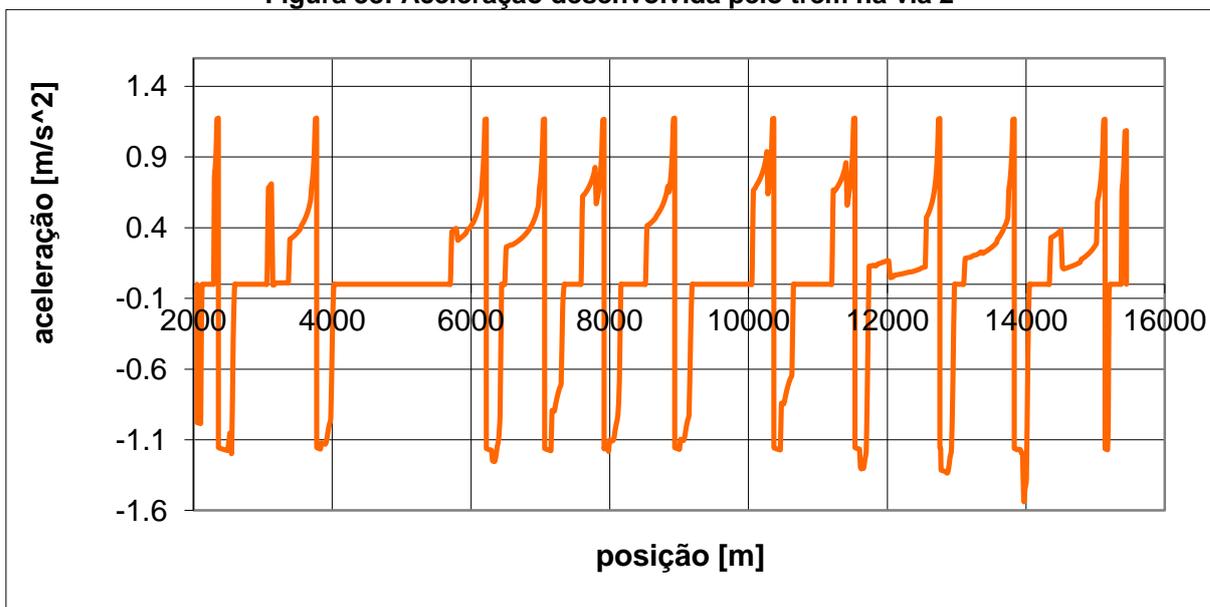
As figuras 37 e 38 mostram os resultados da simulação da aceleração do trem nas vias 1 e 2, respectivamente. Estes resultados foram obtidos por meio da simulação da equação 34, considerando $v_1 = 0$.

Figura 37: Aceleração desenvolvida pelo trem na via 1



Fonte: (Autor)

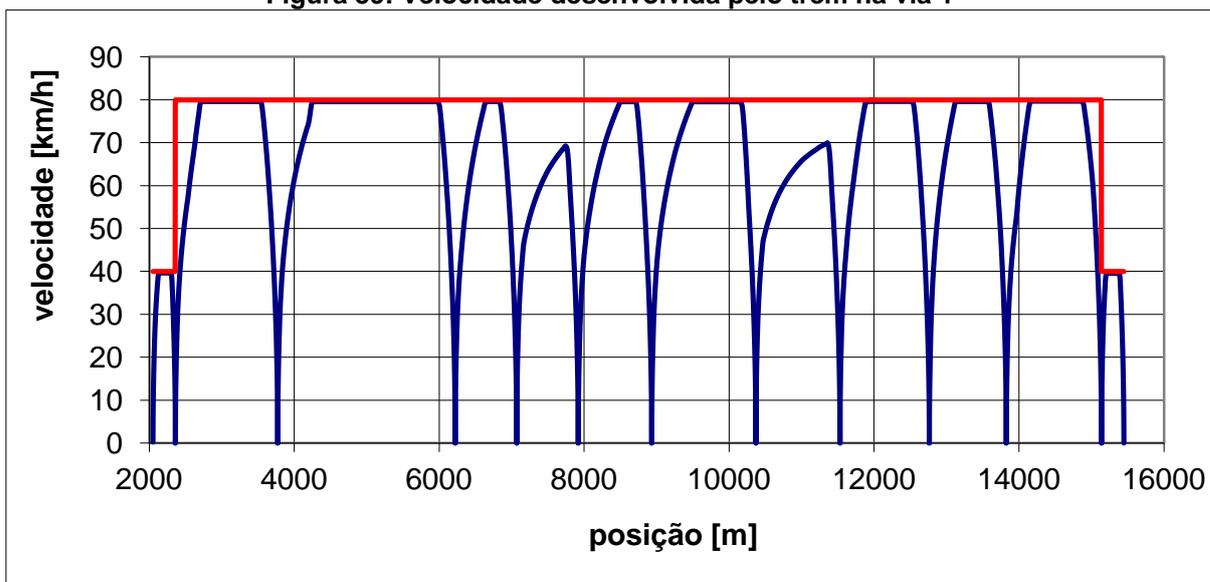
Figura 38: Aceleração desenvolvida pelo trem na via 2



Fonte: (Autor)

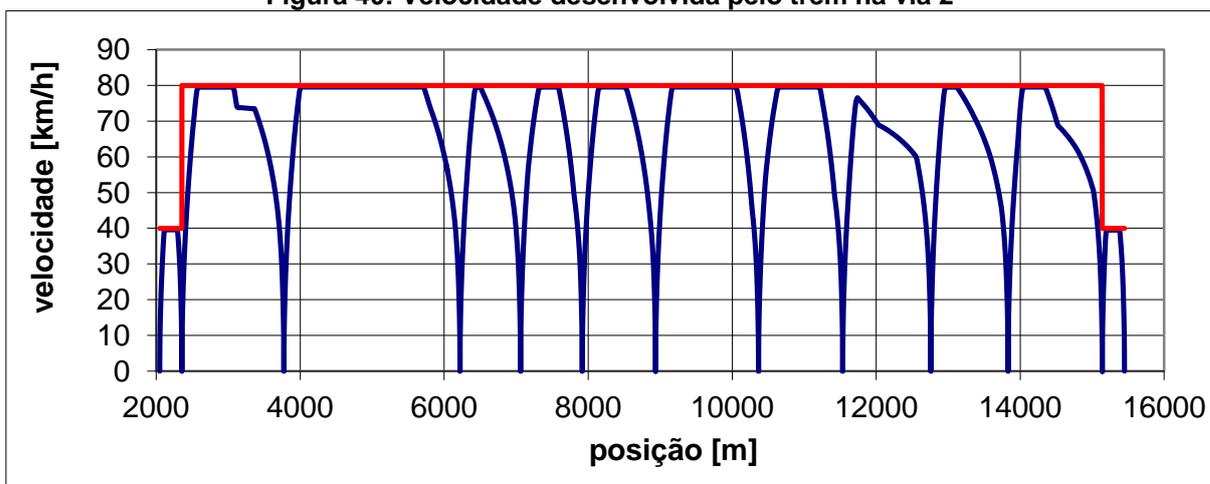
As figuras 39 e 40 mostram os resultados da simulação da velocidade do trem nas vias 1 e 2, respectivamente. Estes dados foram obtidos por meio da simulação da equação 60, adotando um Δt para simulação de um segundo.

Figura 39: Velocidade desenvolvida pelo trem na via 1



Fonte: (Autor)

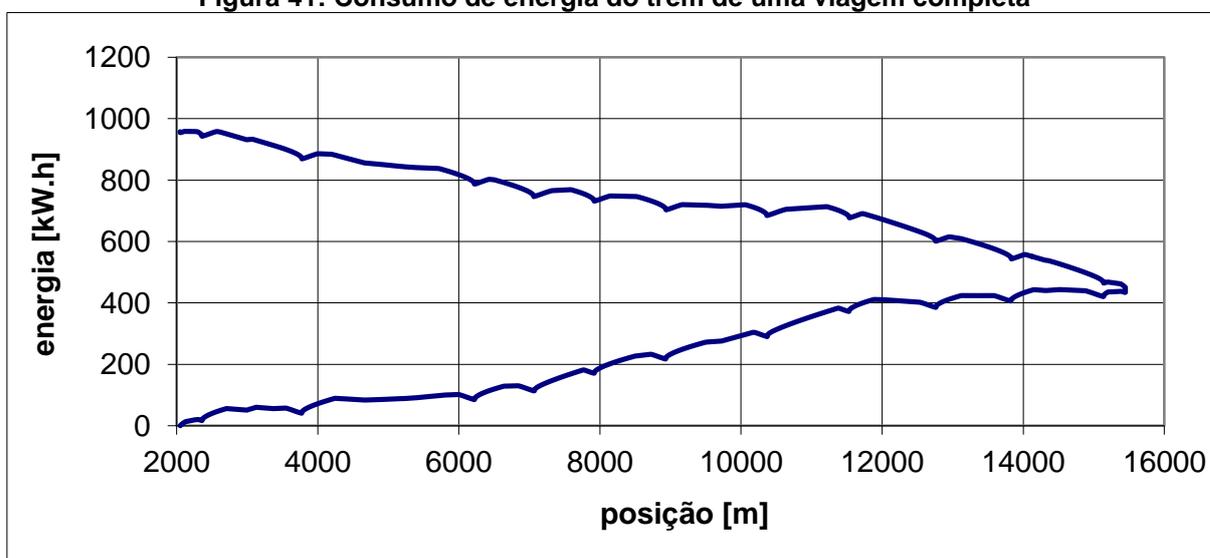
Figura 40: Velocidade desenvolvida pelo trem na via 2



Fonte: (Autor)

A figura 41 mostra os resultados da simulação do consumo de energia do trem de uma viagem completa. Estes dados foram obtidos por meio da simulação da equação 39.

Figura 41: Consumo de energia do trem de uma viagem completa

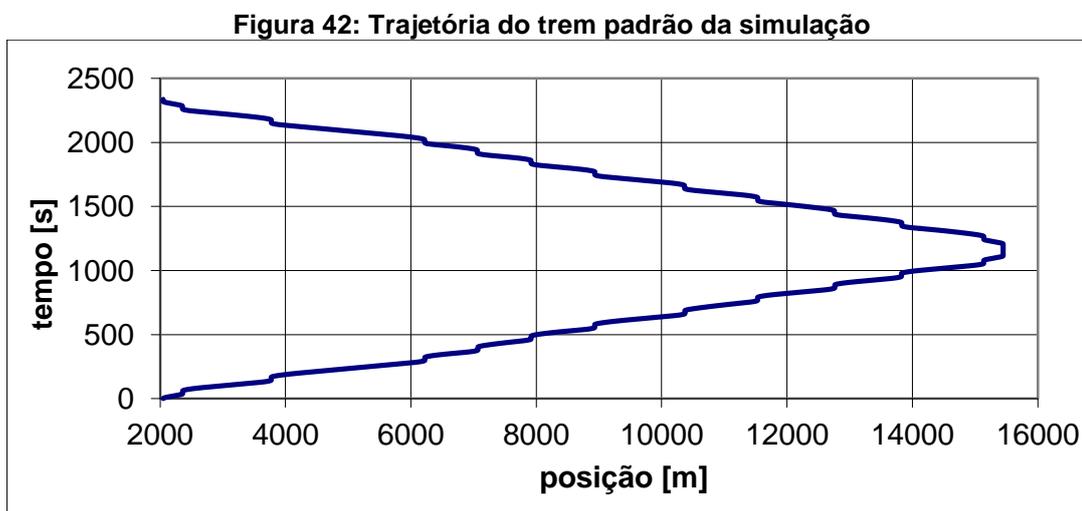


Fonte: (Autor)

Por meio da análise da figura 41, pode-se notar a coerência dos dados da simulação da tração do trem. A simulação do consumo de energia apresentou um erro de 11,85%.

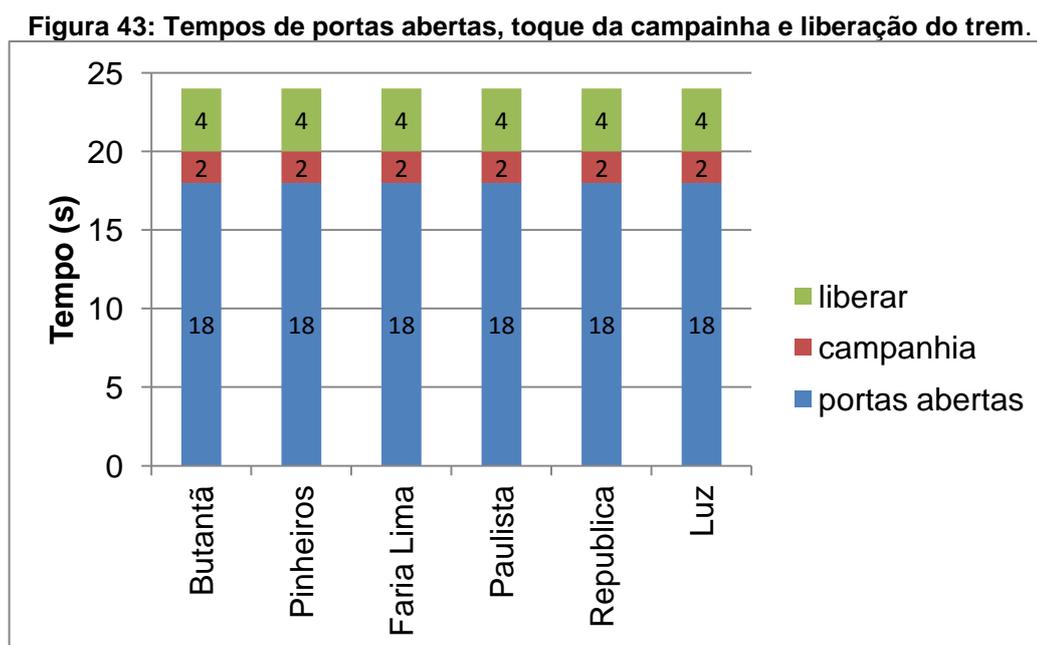
4.7.5. Resultados da simulação do tráfego de trens

A figura 42 mostra a trajetória do trem padrão, obtida por meio da simulação das equações 32, 33 e 34.



Fonte: (Autor)

Na figura 43 são apresentadas as três parcelas componentes do tempo de parada para as estações da Linha 4-Amarela do Metrô de São Paulo, na hora mais crítica do pico da manhã.



Fonte: (Autor)

A simulação de tráfego é realizada com os resultados da simulação da tração de um trem padrão. O simulador calcula o número de trens por meio da equação 70, utilizando os dados:

- a) do tempo total de viagem definido na simulação do trem padrão;
- b) o valor headway definido pela operação da linha de metrô.

Os resultados estão listados na tabela 24.

Tabela 24: Características operacionais da linha 4

Característica	Valor
Intervalo entre trens - headway	123s
Número de estações	11
Tempo de parada na estação	24s
Número de trens	19
Tempo de total de viagem	2337,5 s

Fonte: (Autor)

Para elaboração do diagrama horário, foi adotado:

- a) o tempo de inversão no ponto de reversão 1 (2050 m) de 15 segundos;
- b) o tempo de inversão no ponto de inversão 2 (15.447 m) de 91 segundos;
- c) o tempo de parada nas estações de 23s, determinado pela aplicação da equação 42

Para determinação do tempo de parada, foram adotados os seguintes parâmetros de tempo, conforme ilustrado na figura 43:

- a) o tempo de portas abertas de 18 segundos;
- b) o tempo de toque da campainha de 2 segundos;
- c) o tempo para liberação do trem de 3 segundos;(na figura o tempo é de 4 seg)
ATENÇÃO – na equação vc usou 3 e na figura registrou 4.

$$t_p = t_{pa} + t_{tc} + t_l = 18s + 2s + 4s = 24$$

A simulação do tráfego de trens obteve o tempo total da viagem na linha quatro amarela do metrô de São Paulo de 2337 segundos, para um intervalo entre trem de 123 segundos.

Com o tempo total da viagem de 2337 segundos, a quantidade de trens mostrada na tabela 24 pode ser confirmada pela equação 74.

$$h = \frac{t_v}{n_t} \Rightarrow n_t = \frac{t_v}{h} = \frac{2337s}{123s} = 19$$

O número de trens que passa, por hora, em uma estação da linha 4 amarela do metrô de São Paulo é 29,27, definido pela equação 76.

$$NTH = \frac{3600}{h} = \frac{3600}{123s} = 29,27 \text{ trens/hora}$$

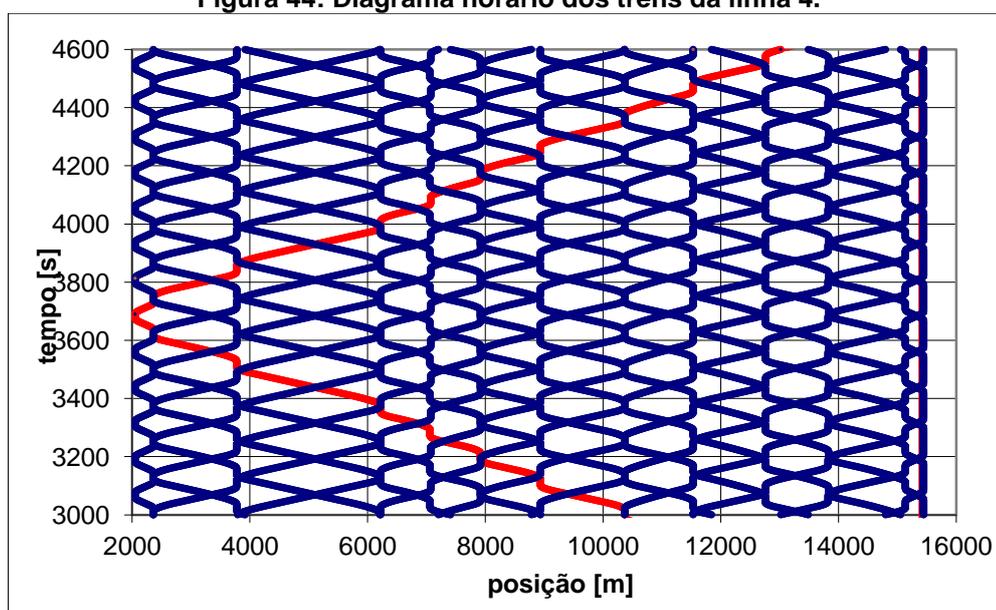
A capacidade máxima projetada de transporte de passageiros da linha 4 amarela do metrô de São Paulo é determinada pela equação 46 e pelos dados característicos do trem:

Para cálculo da capacidade considerando a taxa de ocupação de 6 passageiros por metro quadrado, a área útil do trem de 200m², 340 lugares para pessoas sentadas, a capacidade de oferta de lugares do trem da linha 4 é de aproximadamente 1540 pessoas por trem.

$$NPL = CPT \cdot NTH = 1540 \cdot 29,27 = 45.075,8 \text{ passageiros/hora /sentido}$$

Com os dados da tabela 24 e os valores da simulação do trem padrão determinados no item 3.3, a simulação do tráfego dos trens determina o diagrama horário da linha, conforme ilustrado na figura 50. A linha vermelha indica a posição da simulação do trem padrão.

Figura 44: Diagrama horário dos trens da linha 4.



Fonte: (Autor)

4.7.6. Resultados da simulação elétrica

A tabela 25 mostra a energia de frenagem dos trens para a simulação durante a primeira hora de operação. Estes valores mostram:

- a) Energia consumida: é a quantidade de energia consumida pelos trens em cada subestação;
- b) Energia de frenagem disponível: é a quantidade total de energia disponível para recuperação;
- c) Energia de frenagem reaproveitada: é a quantidade de energia que é usada por outros consumidores, incluindo os serviços auxiliares do trem.

Tabela 25: Energias geradas e consumidas na linha 4 - amarela

Subestação retificadora	Energia consumida	Energia de frenagem disponível		Energia de frenagem reaproveitada	
	[kWh]	[kWh]	[%]	[kWh]	[%]
Pátio Vila Sônia	5526,31	2616,07	100	922,94	35,28
Capengue	5967,14	2824,76	100	996,85	35,29
Pinheiros	6643,73	3145,04	100	1080,00	34,34
Fradique Coutinho	6897,05	3264,96	100	1121,18	34,34
Paulista	7089,85	3356,23	100	1119,97	33,37
República	5611,09	2656,21	100	886,11	33,36
Luz	4746,74	2247,03	100	751,85	33,46

Fonte: (Autor)

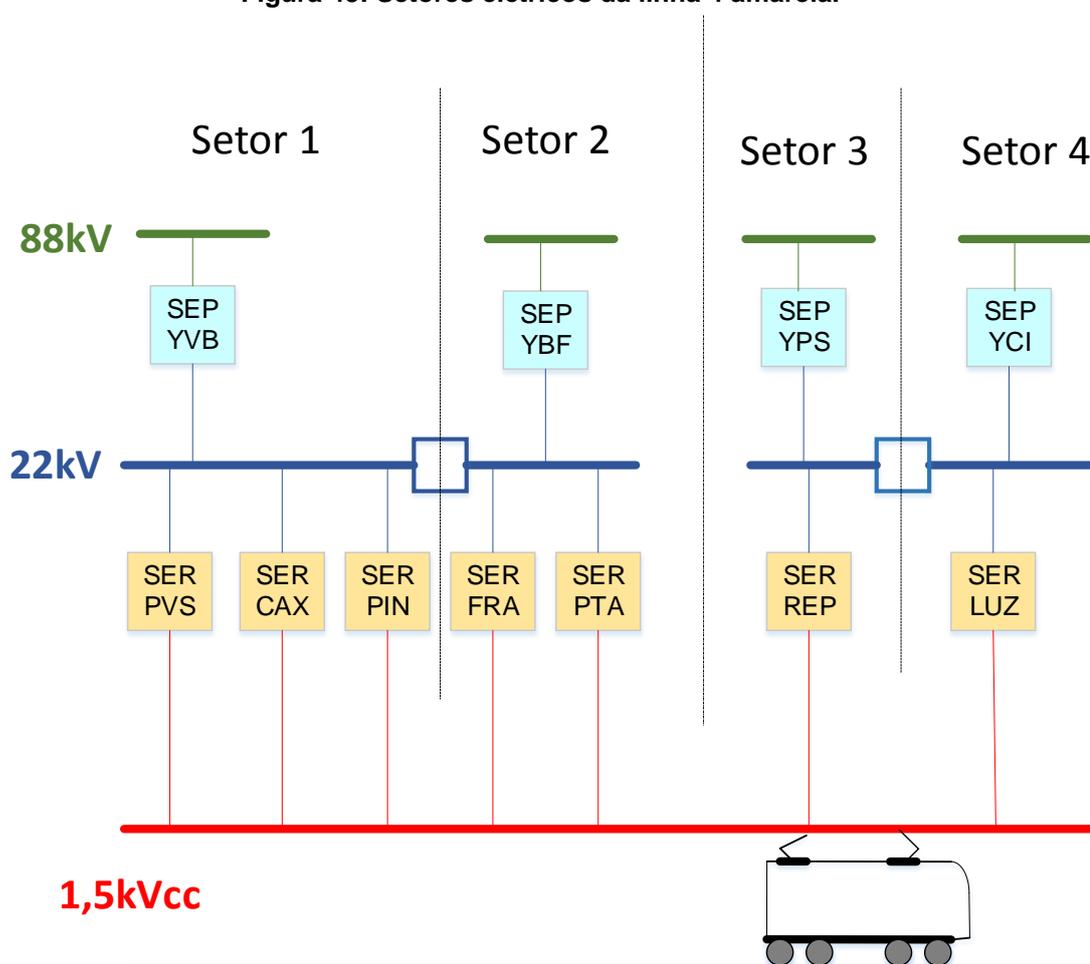
4.8. MEDIÇÕES REALIZADAS NA LINHA 4 AMARELA DO METRÔ DE SÃO PAULO

Para compreender a metodologia de medição utilizada, é necessário o conhecimento da configuração da alimentação elétrica da linha 4 amarela do metrô de São Paulo. Nela, o fornecimento de energia para as subestações retificadoras é realizado em média tensão no nível de 22kV e a distribuição da energia para os trens é realizada em 1580Vcc pela subestações retificadoras.

A distribuição em corrente alternada é dividida em partes denominadas de setores 1, 2, 3 e 4; esta divisão deve-se ao fato de que os pontos de fornecimento de energia pela concessionária têm, como característica, em caso de falha da alimentação de um dos pontos, o socorro do setor sem energia realizado por outro setor, a partir da seguinte regra: os setores 1 e 2 realizam o socorro entre si, em caso de falha, o mesmo acontecendo entre os setores 3 e 4. Não é previsto socorro entre os setores 2 e 3, conforme aparece ilustrado na figura 45.

Todas as saídas das subestações retificadoras são ligadas em paralelo, conforme ilustrado na figura 45.

Figura 45: Setores elétricos da linha 4 amarela.



Fonte: (Autor)

Para comprovação dos resultados obtidos por meio das simulações, foram realizadas medições das grandezas elétricas no sistema de média tensão e de tração da linha 4 - Amarela do Metrô de São Paulo.

Os equipamentos utilizados apresentavam as características mínimas:

- a) sincronização dos horários de medição com a base horária implantada nas subestações e no CCO da Linha 4 – Amarela, por meio do uso do GPS da subestação;
- b) capacidade de armazenamento contínuo das medições durante o período de 24 horas;
- c) uma taxa de amostragem de 2ms.

4.8.1. Procedimento de medição na linha 4 – Amarela

Para comprovação dos valores obtidos nas simulações realizadas nesta pesquisa, foram realizadas medições de corrente e tensão no sistema de tração, incluindo medições no trem. As medições foram divididas em seis grupos:

- a) Medidas de tensão no barramento 1500Vcc das subestações retificadoras, durante a operação comercial;
- b) Medidas de tensão no barramento 1500Vcc das subestações retificadoras, após a operação comercial;
- c) Medidas de corrente no sistema de tração (1500Vcc) em uma subestação retificadora, após o horário comercial;
- d) Medidas de corrente no curto-circuitador de terras durante a operação comercial;
- e) Medidas de tensão e corrente no trem, durante a operação comercial;
- f) Medidas de tensão e corrente no trem, durante a operação comercial, após a operação comercial.

Para realização destas medições foram observados os seguintes aspectos:

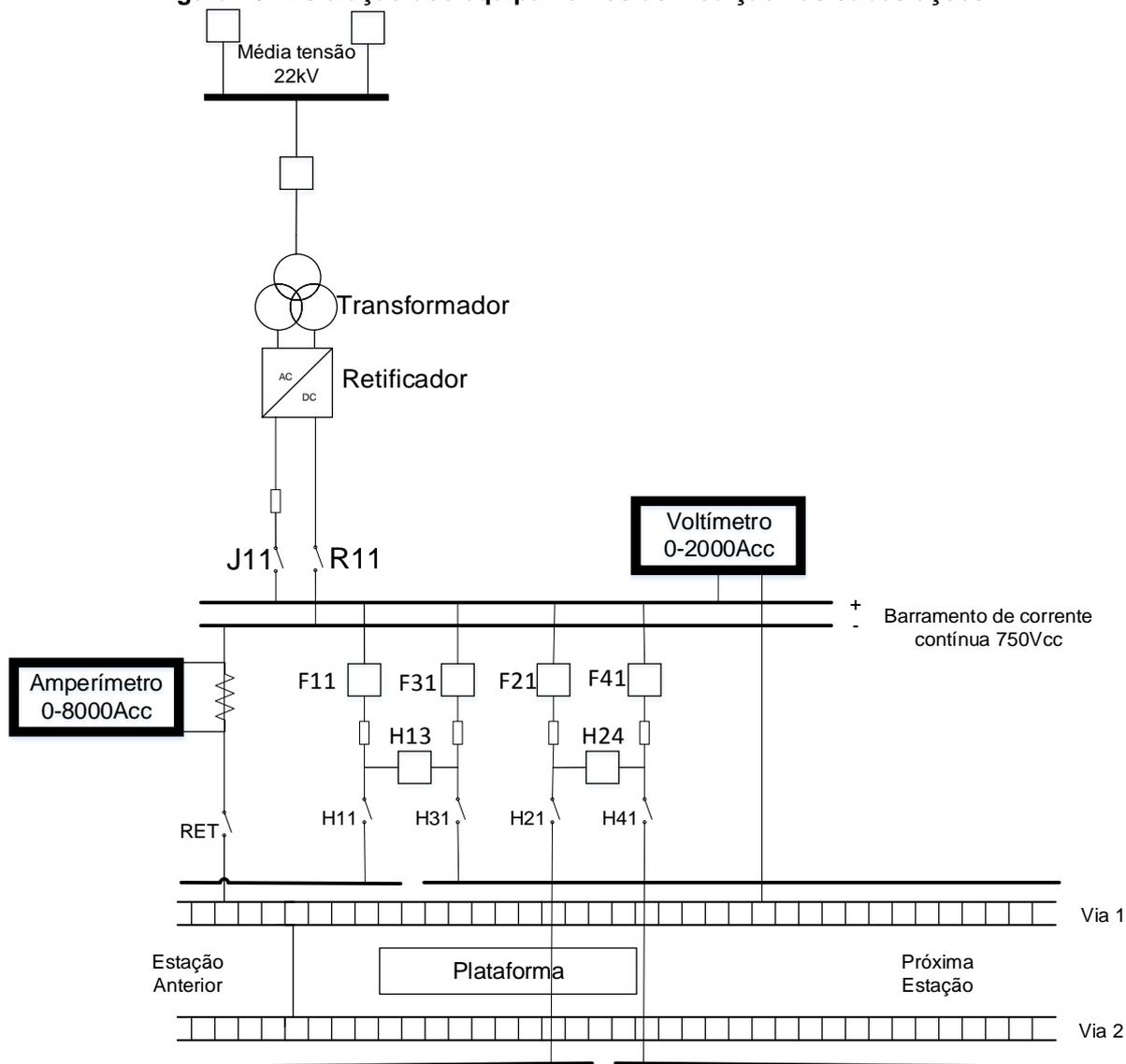
- a) As medições nas subestações retificadoras pertencentes aos setores elétricos 1 e 2 devem ser realizadas de forma independente em relação aos setores elétricos 3 e 4;

- b) os relógios dos instrumentos de medição devem estar sincronizados com o relógio do CCO.

4.8.1.1. Medições nas subestações retificadoras

Foram instalados registradores de dados nas subestações, conforme indicado na figura 46, fora do horário de operação comercial. Os instrumentos foram sincronizados pelo relógio do CCO.

Figura 46: Instalação dos equipamentos de medição nas subestações



Fonte: (Autor)

Após a instalação do medidor, foi iniciada a aquisição e gravação das medições do sistema elétrico, até a data de sua retirada do sistema. Após um período mínimo de 24 horas, os registros foram transferidos para uma base de dados.

As primeiras medições foram realizadas nas subestações retificadoras Caxingui, Pinheiros e Paulista, pertencentes aos setores elétricos 1 e 2. Após seu término, foram iniciadas as medições das subestações retificadoras pertencentes aos setores elétricos 3 e 4.

Para cada uma das condições descritas foi mantida a circulação normal de trens, com, no mínimo, doze veículos circulando do Butantã à Luz; cada uma das condições foi mantida por um período mínimo de uma hora. No anexo A1 estão as medições iniciais realizadas nas subestações retificadoras.

4.8.1.2. Medições na subestação retificadora de República

A construção da linha 4 amarela foi realizada em fases e, atualmente, somente a fase um foi realizada, com a circulação de, no máximo, 12 trens. Dado que este estudo contempla a linha na sua fase final de construção, foi necessário realizar medidas na região entre as estações Paulista e Luz, com apenas a Subestação Retificadora de República fornecendo energia para o sistema, o que equivale ao tráfego de trens da fase final da linha.

As medições na subestação retificadora de República foram divididas em seis grupos:

- a) medida da corrente da partida de um trem posicionado na plataforma da estação;
- b) medida da corrente da partida simultânea de dois trens posicionados nas plataformas da estação;
- c) medida da corrente da partida simultânea de três trens posicionados nas proximidades da estação;

- d) medida da corrente de regime da circulação de 1 trem entre as estações de Paulista e Luz;
- e) medida da corrente de regime da circulação de 4 trens entre as estações de Paulista e Luz;
- f) medida da corrente de regime da circulação de 6 trens entre as estações de Paulista e Luz.

Durante a realização dessas medições, as demais subestações retificadoras estavam fora do sistema, com exceção da Subestação Retificadora “não controlada” do Pátio Vila Sônia. Os equipamentos de medição foram instalados no cabo de retorno das seccionadoras RET da Subestação Retificadora de República. No anexo A2 estão as medições iniciais realizadas na subestação retificadora República.

4.8.1.3. Medidas de tensão e corrente no trem da linha 4

Foram realizadas medidas de tensão e corrente em um carro do trem, efetuando uma volta completa no trecho operacional durante o horário comercial, nos períodos de pico da manhã, pico da tarde e vale.

As medições, no trem da linha 4, foram divididas em quatro:

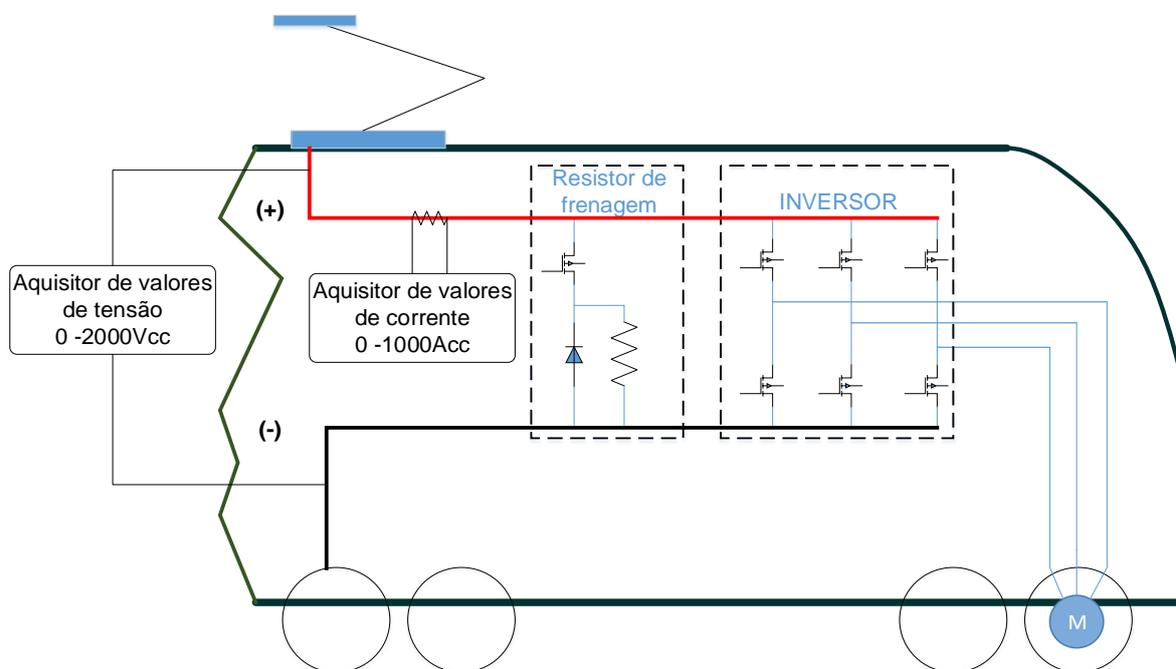
- a) corrente na linha de alimentação dos inversores de tração e tensão na linha dos conversores auxiliares;
- b) tensão na linha de alimentação dos inversores de tração;
- c) corrente na linha de alimentação dos conversores auxiliares;
- d) registro das medições de aceleração com a utilização de um acelerômetro.

Devido à complexidade da medição dos valores no trem, para medição dos valores das tensões e correntes de tração, foi adotado medir em uma das seis

composições do trem. Isto significa que para obter o valor total da tensão e da corrente do trem os valores medidos foram multiplicados por 5,5.

Este método de medição não acarreta erros significativos devido ao fato de 5 dos seis carros serem idênticos na sua concepção, sendo que, apenas o carro de controle, devido à instalação dos equipamentos de controle, tem a metade dos motores de tração das demais unidades. A figura 47 ilustra a instalação dos medidores em um carro do trem.

Figura 47: Instalação dos equipamentos de medição no trem – tração



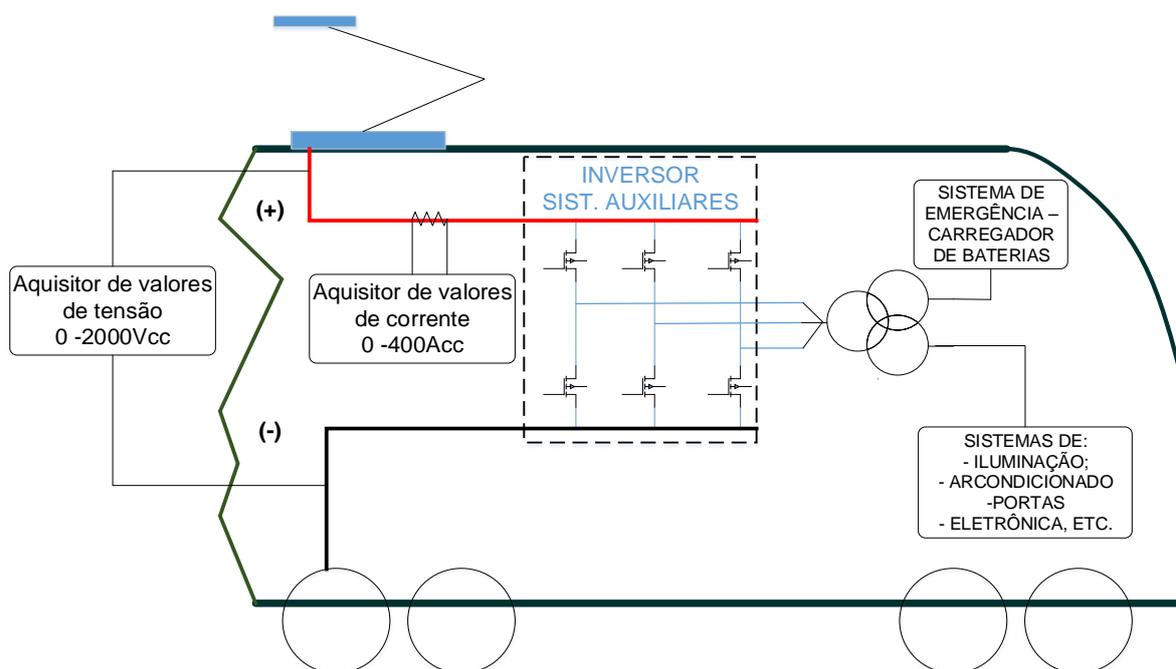
Fonte: (Autor)

No trem, grande parte da energia consumida é devida à tração; porém, não é possível ignorar a energia consumida pelos sistemas auxiliares, que são compostos pela iluminação, ar condicionado, controle das portas, carregador de bateria, etc.

O fornecimento de energia para os sistemas auxiliares é realizado por um sistema de fornecimento de energia em baixa tensão, que é composta, basicamente, por um inversor de frequência.

Na configuração do trem da linha quatro, cada unidade inversora fornece energia para dois carros do trem; por esta razão foi realizada a medida da corrente separado por carros, conforme ilustrado na figura 48. Devido a esta configuração, para obter a energia total consumida pelos sistemas auxiliares, os valores medidos foram multiplicados por 3.

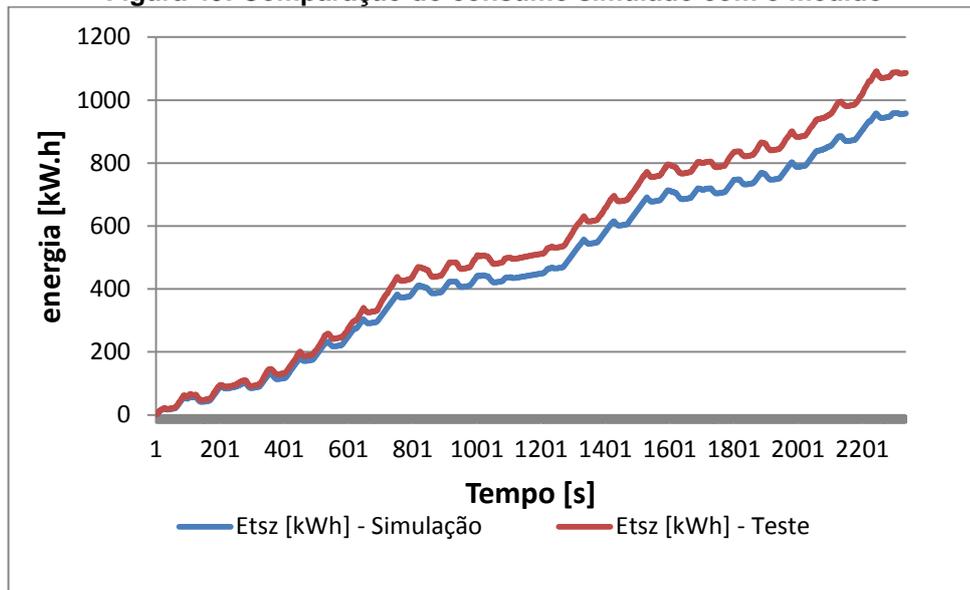
Figura 48: Instalação dos equipamentos de medição no trem – Sistemas auxiliares



Fonte: (Autor)

Os dados de consumo de energia foram obtidos nos testes realizados no trem 4105 da linha 4 amarela do metrô de São Paulo em 27 junho de 2012. No anexo A2 estão as medições iniciais realizadas no trem.

Pela análise da figura 49 pode-se notar a coerência dos dados da simulação da tração do trem. A simulação do consumo de energia apresentou um erro de 11,85%.

Figura 49: Comparação do consumo simulado com o medido

Fonte: (Autor)

5. ALGORITMO DE CONTROLE DE TRAÇÃO PARA REGENERAÇÃO DE ENERGIA METROVIÁRIA – ACTREM

Neste trabalho é proposto o desenvolvimento de Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária – ACTREM visando o aumento da eficiência energética da linha 4 - Amarela do metrô da cidade de São Paulo.

O algoritmo, se implementado, possibilitará a coordenação da movimentação dos trens, aumentando a sobreposição dos intervalos de tempos das acelerações e frenagens dos veículos e ampliando a utilização da energia proveniente das suas frenagens. O algoritmo, para aumentar o tempo de sobreposição dos ciclos de frenagem e aceleração, devido a mudança do tempo de parada nas estações o diagrama horário dos trens é modificado.

Sincronizar a aceleração e frenagem de trens diferentes, por meio da otimização do diagrama horário dos veículos de um sistema metroviário, é uma solução com baixo custo de implantação, mas, eficaz para maximizar o uso de frenagem regenerativa nos sistemas metroviários urbanos. Essa solução permite tanto economizar energia de tração como também ajuda a reduzir os picos de energia causados por aceleração simultânea de vários trens no sistema. O efeito desta medida será mais perceptível em redes urbanas densas, como a do metrô da cidade de São Paulo, onde há uma maior probabilidade de correspondência das fases de aceleração e frenagem com menos influência nos horários de serviço.

Aumentar a utilização da energia proveniente da frenagem dos trens no transporte metroviário urbano por meio da otimização dos diagramas horários tem sido proposto por vários autores.

No trabalho de (Nasri A., 2010) foi desenvolvido um método de otimização que, com base em um algoritmo genético que determina os valores de tempo ótimos que maximizam o uso de frenagem regenerativa.

Gonzalez e Palacin, realizam um estudo da economia com a otimização do diagrama horário no metrô de Paris. Estes estudos apontam para uma economia de energia de tração de, até, 14% (GONZALEZ-GIL, et al., 2014).

O estudo de (PEÑA-ALCARAZ, et al., 2011) propôs um novo diagrama horário para a linha 3 do metrô de Madrid, resolvendo um problema de otimização por meio da aplicação de algoritmos de controle. Após uma semana de aplicação, obteve-se uma economia de energia média de 3%, embora os autores afirmem que este número pode ser de 7%, se restrições impostas pela operação da concessionária fossem menos severas. Por último, é necessário mencionar o caso do sistema de metrô de Rennes, onde uma economia anual de 12% foi obtida por meio da otimização do diagrama horário com alterações das durações de parada na estação (BOIZUMEAU, et al., 2011).

Nenhum dos estudos mencionados foi aplicado a uma rede de metrô com a demanda do metrô da cidade de São Paulo. Uma implementação nestas condições requer um sistema de controle que garanta que não ocorrerá diminuição na demanda de transporte ou aumentos significativos no tempo da viagem.

A implementação de um sistema de controle de tração por meio da otimização do diagrama horário tem custos baixos de investimento, especialmente se comparada com a instalação de acumuladores de energia ESS ou subestações inversoras; este fato torna-a uma opção fundamental para o aumento da eficiência energética, utilizando a energia proveniente da frenagem regenerativa no transporte metroviário.

5.1. MODELAGEM MATEMÁTICA DO ALGORITMO DE CONTROLE - ACTREM

Para desenvolvimento do Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária – ACTREM, por meio da otimização do diagrama horário, é necessário fazer a sua modelagem matemática .

5.1.1. Definição dos parâmetros do modelo

Devido às características de tráfegos de trens em sistemas de metrô, o tempo de viagem entre estações pode ser considerado constante; a otimização do diagrama horário é realizada modificando os tempos de parada dos trens nas estações, de forma que aumente a coincidência dos seus tempos de aceleração e frenagem para diminuição do consumo de energia.

Serão utilizados como variáveis do modelo os tempos de transição dos ciclos de tração definidos no item 4.4.5 desta tese de doutorado.

Os parâmetros para elaboração do modelo matemático para otimização do diagrama horário utilizados neste trabalho de pesquisa são:

NE – número total de estações

NT – número total de trens

tv_n - tempo de viagem entre as estações de n e $n + 1$;

Δt_a – período de tempo de aceleração do trem;

Δt_f - período de tempo de frenagem do trem;

ts_a – período de sobreposição de tempo na condição 1;

ts_f - período de sobreposição de tempo na condição 2;

Neste trabalho de pesquisa as variáveis de decisão definidas para elaboração do modelo são:

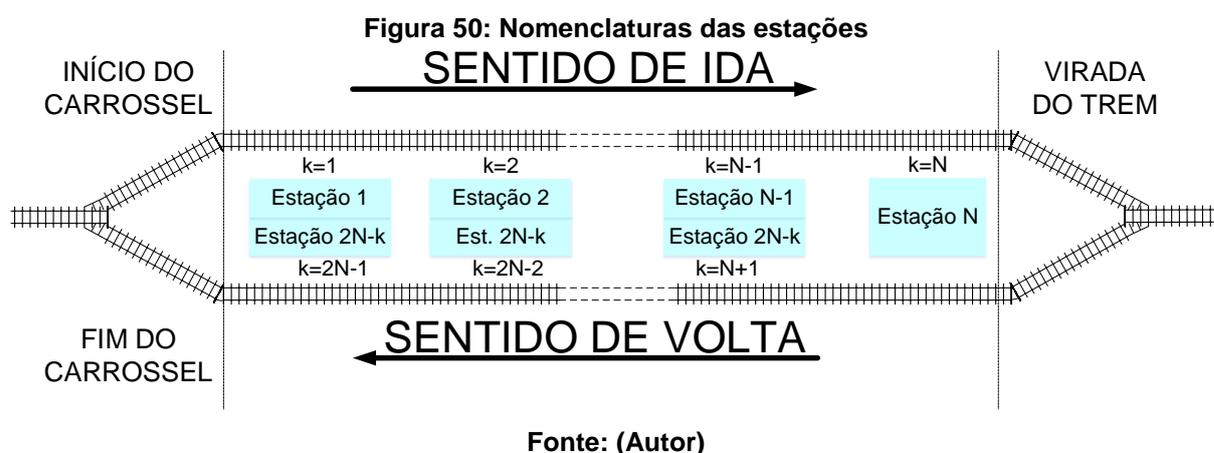
- a) h intervalos entre os trens, conhecido nas empresas de transporte sobre trilhos de headway;
- b) $ta1_{in}$ tempo do início da aceleração do trem "i" partindo da estação "n";
- c) $tf1_{in}$ tempo do início da frenagem do trem "i" chegando na estação "n";
- d) t_{pn} tempo de permanência exigido na estação n.

As variáveis intermediárias utilizadas neste trabalho de pesquisa são:

- a) ta_{2in} tempo final da aceleração do trem "i" após a partida da estação "n", que é definido como $ta_{2in} = ta_{1in} + \Delta t_a$;
- b) tf_{2in} instante final da frenagem do trem "i" antes da chegada à estação "n", que é definido como $tf_{2in} = tf_{1in} - \Delta t_f$.

5.1.2. Descrição do tráfego de trens

Devido às características de operação de sistemas de metrô, os trens partem da primeira estação e se movimentam ao longo da via metroviária até a estação terminal N. Em seguida, eles se movimentam de volta para a primeira estação. Este processo é mostrado na figura 50.



Nesta tese de doutorado foi adotado que o movimento dos trens é similar ao movimento de um carrossel. Desta maneira foi convencionado que as estações:

- a) no sentido de ida como $n = \{1, 2, 3, \dots, N - 1, N\}$;
- b) no sentido de volta como $n = \{N, N - 1, \dots, 2N - k\}$

Cada estação tem dois tempos de parada, um na viagem de ida e outro na viagem de volta, devido a este fato foi necessário definir o fator $k = \{1, 2, \dots, 2N - 1\}$ que é uma indicação crescente da parada para embarque dos usuários na linha de metrô em estudo. Na prática, para $1 \leq k < 2NE$, a estação da parada k e estação da parada $2N - k$ são a mesma estação de metrô no local físico, conforme ilustra a figura 56.

Nesta pesquisa foi adotado $kt = \{1, 2, \dots, NT\}$ como prefixo crescente dos trens. Para elaboração da formulação do modelo matemático, o conjunto dos prefixos dos trens foi dividido em dois, no sentido de ida como i e no sentido de retorno como j . Desta maneira, estas duas partes convencionado que os trens:

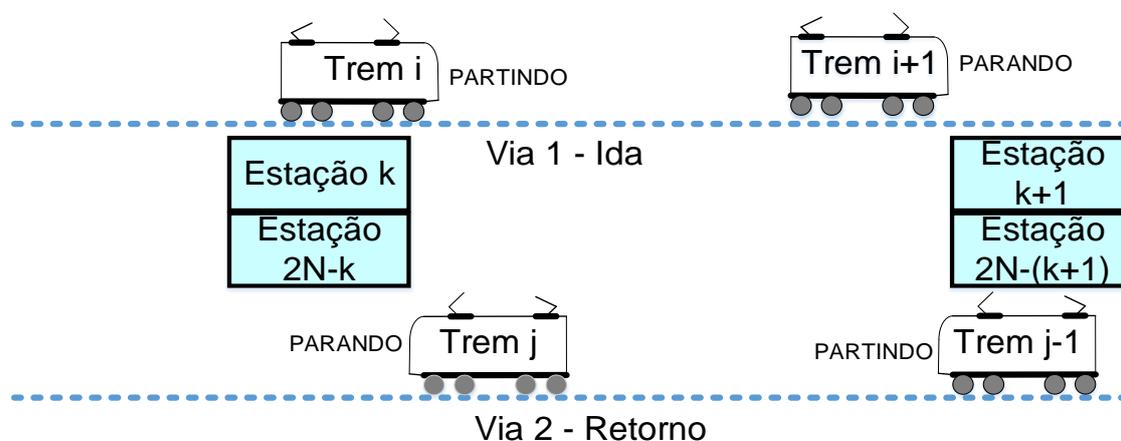
- no sentido de ida como $i = \{1, 2, 3, \dots, I - 1, I\}$ onde I é prefixo do último trem no sentido de ida;
- no sentido de volta como $j = \{I + 1, \dots, NT - 1, NT\}$.

Para elaborar o algoritmo de controle do tráfego de trens - ACTREM, foram definidas duas condições:

- Condição 1: Trem chegando na estação “ n ” e um trem partindo da estação “ n ”;
- Condição 2: Trem chegando na estação “ n ” e um trem partindo da estação “ $n+1$ ”.

A figura 51 ilustra a movimentação de chegada e partida de trens para a condição 1, onde, na via 1 o trem i , na direção de ida, parte da estação da parada k e o trem $i+1$ chega na estação da parada $n+1$. Na via 2 o trem j , na direção de volta, chega na estação da parada $2N - k$ e o trem $j-1$ parte para da estação de parada $2N - (k + 1)$.

Figura 51: Movimentação de chegada e partida de trens na condição 1.

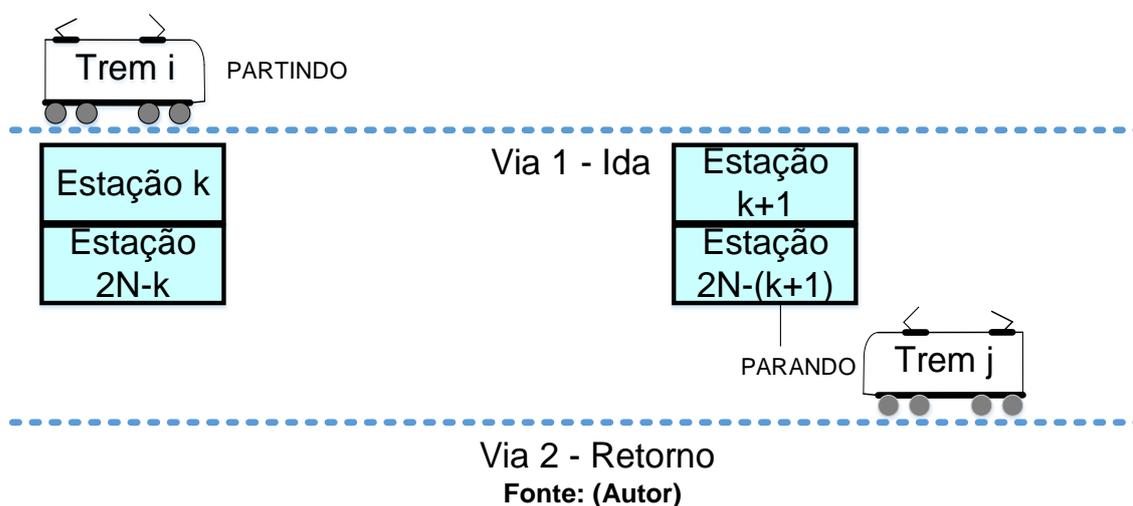


Fonte: (Autor)

Observe-se que as estações k e $2N - k$ são a mesma estação de metrô em relação à localização física; esta regra também se aplica às estações $k+1$ e $2N - (k + 1)$, o que significa que trem i pode absorver a energia gerada a partir da frenagem regenerativa do trem j e que o trem $i+1$ pode absorver a energia gerada a partir da frenagem regenerativa do trem $j-1$.

A figura 52 ilustra a movimentação de chegada e partida de trens para a condição 2, onde, na via 1 o trem i está partindo da estação da parada k e na via 2 o trem j está parando na estação de parada $2N - (k + 1)$. Isto significa que a recuperação de energia gerada a partir de trem j pode ser absorvida pelo trem i .

Figura 52: Movimentação de chegada e partida de trens na condição 2.



Em um sistema de metrô com uma elevada demanda de usuários, como ocorre na cidade de São Paulo, é impossível coordenar todos os tempos de intervalo de aceleração e frenagem para todos os trens em todas as estações, individualmente. O objetivo do algoritmo desenvolvido neste trabalho é melhorar a sincronização do tempo de aceleração e frenagem no mesmo setor elétrico, de modo que a utilização da energia de recuperação seja melhorada.

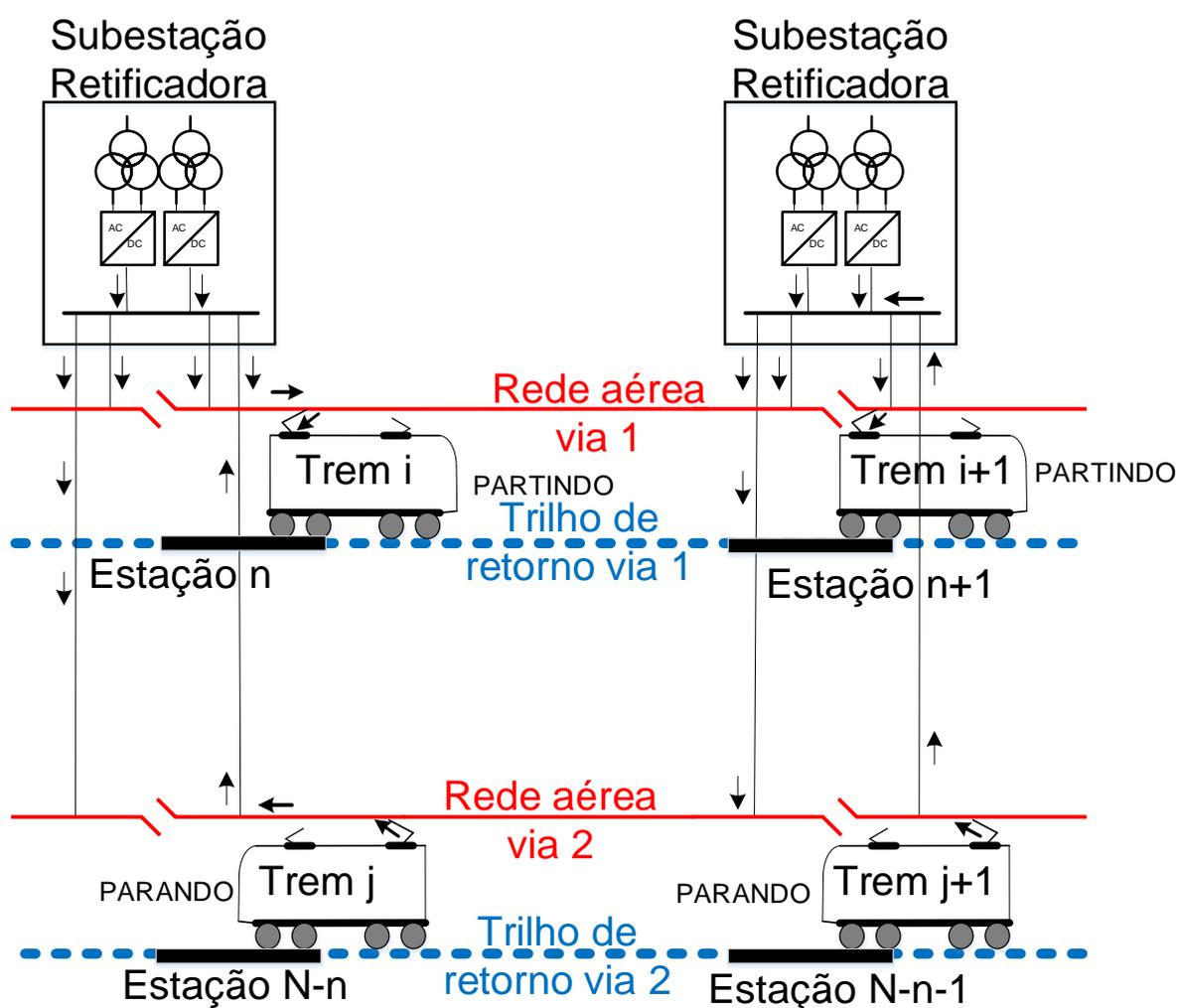
5.1.3. Premissas adotadas para elaboração do modelo

De acordo com as características de operação do sistema metroviário da cidade de São Paulo, o modelo foi elaborado a partir das seguintes premissas:

- a) Somente uma pequena parte da energia de regeneração da frenagem é utilizada pelos serviços auxiliares de bordo do trem; a maioria da energia é enviada para o circuito de distribuição;
- b) Todos os trens compartilham um diagrama horário comum, defasados pelo tempo de intervalos entre os trens;
- c) O tempo de parada do trem na plataforma é determinado para cada estação;
- d) O tempo de viagem entre estações será considerado constante, o que significa que o diagrama horário é cíclico;
- e) A recuperação de energia gerada pela frenagem do trem pode retornar à linha de distribuição DC e ser imediatamente utilizada por outro trem no ciclo de aceleração. Se a energia da frenagem não puder ser utilizada, a energia excedente será dissipada por meio de resistências;
- f) Não são consideradas as perdas de transmissão de energia elétrica, devido à curta distância para transmissão da energia entre dois trens sucessivos;
- g) O trem recebe energia apenas das subestações retificadoras adjacentes a sua posição;
- h) A região entre duas subestações retificadoras, neste trabalho, é definida como zona elétrica;
- i) A energia proveniente da frenagem de um trem pode ser absorvida por trens que pertencem à mesma zona elétrica. Por exemplo, na figura 53, a energia gerada pela frenagem regenerativa do trem j pode ser utilizada para a aceleração do trem i , e a energia gerada pela frenagem regenerativa do trem $j + 1$ pode ser usada para a aceleração do trem $i - 1$. As setas indicam a direção da corrente;
- j) Todos os trens movimentam-se na mesma direção e compartilham o mesmo diagrama horário, o que significa que o intervalo entre trens e o tempo de viagem em cada seção é igual para todos os trens, exceto o tempo de permanência na estação, que pode ser diferenciado;

- k) Em todas as seções entre duas estações, os tempos de aceleração e frenagem dos trens são parâmetros conhecidos, que são usados pelo algoritmo de controle ACTREM para aumentar a eficiência energética do sistema metroviário com base no diagrama horário atual.

Figura 53: Zona elétrica de distribuição de energia para sistemas metroviários



Fonte: (Autor)

5.1.4. Restrições da função objetivo

Para o desenvolvimento do algoritmo de controle ACTREM, devido às características do metrô da cidade de São Paulo, foram definidas duas restrições:

- a) O tempo total do ciclo de viagem Δtcv não pode ter uma alteração maior que 5% do tempo total do ciclo de viagem padrão;
- b) A capacidade de transporte de passageiros NPL da linha metroviária em estudo, definida pela engenharia de operação, pode ser reduzida, no máximo, em 1%.

O tempo total do ciclo de viagem é definido pelo somatório do tempo de parada do trem na estação tp_n , pelo tempo de viagem entre estações tv_n e pelo tempo de transposição de uma via para outra t_t , conforme equação 60.

$$\Delta tcv = \sum_{n=1}^{2NE-2} (tp_n + tv_n) + t_t \quad (60)$$

De acordo com a demanda de operação, cada trem deve satisfazer a restrição do tempo total do ciclo da viagem, onde:

- a) $\Delta tcv_{min} = 0,95. \Delta tcv$ é o tempo mínimo do ciclo de viagem;
- b) $\Delta tcv_{max} = 1,01. \Delta tcv$ é o tempo máximo do ciclo de viagem.

As alterações do tempo de parada do trem na plataforma tp_n , definidas pelo algoritmo de controle ACTREM, estarão dentro dos limites estabelecidos pela equação 61.

$$\Delta tcv_{min} \leq t_t + \sum_{n=1}^{2NE-2} (tp_n + tv_n) \leq \Delta tcv_{max} \quad (61)$$

Para um diagrama horário cíclico, o intervalo de tempo entre trens determina a capacidade de transporte da linha. Reorganizando as equações 45 e 46, é possível determinar a relação entre capacidade de transporte de passageiros NPL e intervalo entre trens.

$$h = \frac{CPT. 3600}{NPL} \quad (62)$$

De acordo com a demanda de operação, cada trem deve satisfazer a restrição de capacidade de transporte de passageiros NPL , onde:

- a) $h_{min} = \Delta tcv/1,01$ é o intervalo mínimo entre trens;
 b) $h_{max} = \Delta tcv/0,95$ é o intervalo máximo entre trens.

O algoritmo de controle ACTREM deverá atender às restrições da equação 63.

$$h_{min} \leq h \leq h_{max} \quad (63)$$

As alterações do tempo de parada do trem na plataforma tp_n , definidas pelo algoritmo de controle ACTREM, modificam o intervalo entre trens. Reescrevendo a equação 74, é possível determinar a relação do tempo de parada do trem na plataforma com o intervalo entre trens.

$$h = \frac{\Delta tcv}{NT} = \left(\sum_{k=1}^{2NE-2} (tp_n + tv_n) + t_t \right) / NT \quad (64)$$

Para trens do metrô é necessário reservar um tempo de parada na estação para os passageiros que entram e saem ; assim, a janela de tempo de espera em cada estação é necessária. Para cada $1 \leq n \leq 2N-2$ (e como o tempo de viagem entre estações tv_n é considerado constante), temos as seguintes restrições:

$$tp_{min} \leq tp_n \leq tp_{max} \quad (65)$$

Onde:

- O somatório de todas as paradas determinadas pelo algoritmo de controle ACTREM não pode ser inferior a 95% das paradas programadas pela engenharia de operação;
- O somatório de todas as paradas determinadas pelo algoritmo de controle ACTREM não pode ser superior a 101% das paradas programadas pela engenharia de operação;
- O tempo de parada mínimo não pode ser inferior a 90% do tempo de parada programado pela engenharia de operação;
- O tempo de parada máximo não pode ser superior a 140% do tempo de parada programado pela engenharia de operação.

A restrição de capacidade imposta pelo sistema de sinalização e pelo fluxo de passageiros impõe que o algoritmo de controle ACTREM deva satisfazer as seguintes restrições:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta tcv = \sum_{k=1}^{2NE-2} (tp_n + tv_n) + t_t \\ h_{min} \leq h \leq h_{max} \\ tp_{min} \leq tp_n \leq tp_{max} \\ \Delta tcv_{min} \leq t_t + \sum_{k=1}^{2NE-2} (tp_n + tv_n) \leq \Delta tcv_m \end{array} \right. \quad (66)$$

5.1.5. Função objetivo do controle de tráfego.

Baseado na equação 34 do movimento do trem, a velocidade do trem i durante o deslocamento para estação n é definida por:

$$\left\{ \begin{array}{ll} v_{in}(t) = a_{in}(t - ta1_{in}) & \text{se } ta1_{in} \leq t \leq ta2_{in} \\ v_{in}(t) = a_{in}\Delta ta - ai_{in}(t - ta2_{in})k_c & \text{se } ta2_{in} \leq t \leq tf1_{i(n+1)} \\ v_{in}(t) = a_{in}\Delta ta - ai_{in}\Delta ti - d_{in}(t - tf1_{in}) & \text{se } tf1_{in} \leq t \leq tf2_{in} \\ v_{in}(t) = 0 & \text{se } tf2_{in} \leq t \leq ta1_{in} \end{array} \right. \quad (67)$$

Onde:

- a_{in} é a aceleração do trem i durante o ciclo de aceleração na estação n ;
- ai_{in} é a aceleração do trem i durante o ciclo inercial na estação n ;
- d_{in} é a desaceleração do trem i durante o ciclo de frenagem na estação n .

Nesta pesquisa adotou-se, para cada incremento do tempo de simulação “ t ”:

- O período de tempo do ciclo de aceleração $\Delta ta = t - ta1_{in}$;
- O período de tempo do ciclo inercial $\Delta ti = t - ta2_{in}$;
- O período de tempo de viagem $\Delta tv = tf1 - ta2_{i(n+1)}$;
- O período de tempo parado na estação $\Delta tp = tf2 - ta1$.

Para cada $1 \leq i \leq NT$, $1 \leq n \leq 2NE - 2$ e $ta1_{in} \leq t \leq tf1_{in}$, a energia elétrica necessária para o movimento do trem i é definida pela equação 68, onde η_{ec} é o rendimento da máquina elétrica como motor.

$$ec(t) = m. \frac{(v_{in}^2(t+1) - v_{in}^2(t))}{2} \cdot \eta_{ec} \quad (68)$$

Onde, para cada $tf1_{in} \leq t \leq tf2_{in}$, a recuperação de energia gerada a partir do trem i é definida pela equação 69, onde η_{eg} é o rendimento da máquina elétrica como gerador.

$$eg(t) = m. \frac{(v_{in}^2(t+1) - v_{in}^2(t))}{2} \cdot \eta_{eg} \quad (69)$$

Para simplificação, foi adotado nesta pesquisa que T_{reg} é o conjunto de tempo em que é possível regenerar energia proveniente das frenagens dos trens:

$$T_{reg} = \{0 \leq t \leq P_0 | ta1_{in} \leq t \leq ta2_{in} \text{ ou } tf1_{in} \leq t \leq tf2_{in}\} \quad (70)$$

Onde P_0 é o período de operação da linha 4 amarela do metrô de São Paulo, compreendido entre 04h40min até as 00h30min.

De acordo com a análise do processo de coordenação, para o trem i concluir o trajeto total da movimentação da estação 1 até a estação $2N - 1$, o total da energia consumida pelo sistema é determinado pela equação 71, para $t \in T_{reg}$.

$$E = \sum_{k=1}^{2NE-1} \sum_{i=1}^{NT} e_c(t) - e_g(t) \quad (71)$$

A formalização e modelagem matemática do controle do tráfego de trens para otimização do consumo de energia podem ser expressas pelo conjunto de equações.

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \\ \text{sujeito a} \end{array} \right. \begin{array}{l} E = \sum_{k=1}^{2NE-1} \sum_{i=1}^{NT} e_c(t) - e_g(t) \\ h = \left(\sum_{k=1}^{2NE-2} (tp_n + tv_n) + t_t \right) / NT \\ h_{min} \leq h \leq h_{max} \\ tp_{min} \leq tp_n \leq tp_{max} \\ tv_{min} \leq t_t + \sum_{k=1}^{2NE-2} (tp_n + tv_n) \leq tv_{max} \end{array} \quad (72)$$

O algoritmo genético pode ser aplicado para resolver um modelo heurístico para obtenção do ótimo intervalo entre trens e para que os tempos de parada em cada estação possam ser calculados. De acordo com a análise, sabemos que existem $2 \cdot NT \cdot (NE - 1)$ variáveis de decisão no modelo da equação 72. Esta modelagem foi adotada para resolução do problema a fim de que a solução possa ser processada em um curto intervalo de tempo para que seja possível a aplicação em tempo real.

5.1.6. Descrição do critério de avaliação da população

O objetivo deste trabalho é encontrar uma configuração equilibrada entre o aumento do tempo de coincidência total entre os ciclos de aceleração e de frenagem dos trens que estão dentro da zona de atuação da subestação retificadora e o tempo total de espera dos passageiros.

5.1.6.1. Critério - o tempo de coincidência total entre os ciclos de aceleração e de frenagem dos trens

O objetivo do modelo desenvolvido nesta pesquisa é maximizar o tempo de coincidência total entre os ciclos de aceleração e de frenagem dos trens que estão dentro da zona de atuação da subestação retificadora.

Para simplificação, nesta pesquisa são definidos $tp = \{tp_n, n = 1, 2, \dots, 2NE - 2\}$ e $tv = \{tv_n, n = 1, 2, \dots, 2NE - 2\}$. É adotado que o primeiro trem para na estação 1 no tempo inicial $t=0$.

Para o sentido de ida quando $1 \leq i \leq NT$ e $1 \leq n \leq NE - 1$, o tempo inicial $ta1_{in}$ que o trem i parte para a estação n é determinado pela equação 73.

$$ta1_{in}(i, n) = (i - 1).h + \sum_{k=1}^{NE} tp_n + \sum_{k=1}^{NE-1} tv_n \quad (73)$$

No sentido de volta, quando o trem i chega à estação N , é necessário um tempo extra para mudança de direção, denominado de tempo de transposição t_t . Portanto, para $N \leq n \leq 2NE - 2$, o tempo inicial $ta1_{in}$ em que o trem i parte para estação $NE-1$ é expresso pela equação 74.

$$ta1_{in}(i, n) = (i - 1).h + \sum_{k=NE}^{2NE} tp_n + \sum_{k=NE}^{2NE-1} tv_n + t_t \quad (74)$$

Então, para $1 \leq n \leq 2N-1$:

- a) o tempo de mudança do ciclo de aceleração para o ciclo de velocidade constante é definido por $ta2_{in}(i, n) = ta_{in}(i, n) + \Delta ta$;
- b) o tempo de mudança do ciclo inercial para o ciclo de frenagem é definido por $tf1_{in}(i, n) = ta2_{in}(i, n) + \Delta tv$;
- c) tempo de chegada à estação de $n+1$ é definido por $tf2_{in}(i, n) = tf1_{in}(i, n) + \Delta tf$.

Nesta tese de doutorado foi adotado $a = \{a \in \Delta ta_{in} | 1 \leq i \leq NT \text{ e } 1 \leq n \leq NE\}$, $f = \{f \in \Delta tf_{in} | 1 \leq i \leq NT \text{ e } 1 \leq n \leq NE - 1\}$ e o tempo de coincidência como $\Delta ts(a, f) = \sum \Delta ta \cap \Delta tf$.

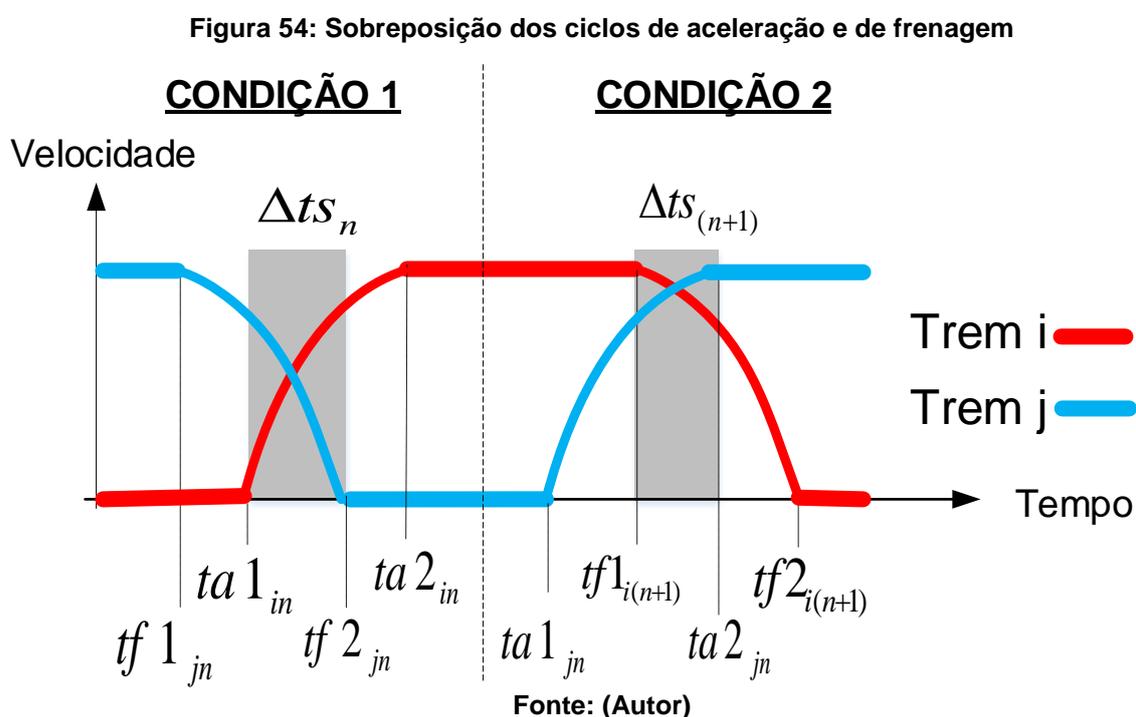
Para cada $1 < i < I-1$ e $1 < n < N-1$, existem duas condições para maximização da sobreposição de tempo $\Delta ts(ta, tf, i, n)$:

- a) Condição 1: Trem chegando à estação “ n ” e um trem partindo da estação “ n ”. A sobreposição de tempo é a diferença do tempo final do ciclo de

frenagem do trem j menos o tempo do início de aceleração do trem i, definida por $\Delta ts_n(ta, tf, i, n)$;

- b) Condição 2: Trem chegando à estação “n” e um trem partindo da estação “n+1”. A sobreposição é a diferença do tempo final do ciclo de aceleração do trem j menos o tempo do início do ciclo de frenagem do trem i, definida por $\Delta ts_{(n+1)}(ta, tf, i, n)$.

A figura 54 ilustra o tempo de sobreposição dos ciclos de aceleração e de frenagem.



Para a sobreposição de tempo Δts_n na condição C1 ser máxima, a diferença deve ser mínima entre

- a) Os tempos iniciais dos ciclos de aceleração e frenagem expressa pelo intervalo de tempo $\Delta ts1_n$ como:

$$\Delta ts1_n = ta1_{in} - tf1_{jn}, \quad \text{se } tf1_{jn} \leq ta1_{in} \leq tf2_{jn} \quad (75)$$

- b) Os tempos finais dos ciclos de aceleração e frenagem expressa pelo intervalo de tempo $\Delta ts2_n$ como:

$$\Delta ts2_n = ta2_{in} - tf2_{jn}, \quad \text{se } ta1_{in} \leq tf2_{jn} \leq ta2_{in} \quad (76)$$

Na condição C1 não existe sobreposição do ciclo de aceleração e de frenagem quando $ta2_{in} < tf1_{jn}$ e $tf2_{jn} < ta1_{in}$.

Para a sobreposição de tempo $\Delta ts_{(n+1)}$ na condição C2 ser máxima, a diferença dever ser mínima entre:

- a) Os tempos iniciais dos ciclos de aceleração e frenagem expressa pelo intervalo de tempo $\Delta ts1_{(n+1)}$ como:

$$\Delta ts1_{(n+1)} = tf1_{i(n+1)} - ta1_{jn}, \quad \text{se } ta1_{jn} \leq tf1_{i(n+1)} \leq ta2_{jn} \quad (77)$$

- b) Os tempos finais dos ciclos de aceleração e frenagem expressa pelo intervalo de tempo $\Delta ts2_{(n+1)}$ como:

$$\Delta ts2_{(n+1)} = tf2_{i(n+1)} - ta2_{jn}, \quad \text{se } tf1_{i(n+1)} \leq ta2_{jn} \leq tf2_{i(n+1)} \quad (78)$$

Na condição C1 não existe sobreposição do ciclo de aceleração e de frenagem quando $ta2_{jn} < tf1_{i(n+1)}$ e se $tf2_{i(n+1)} < ta1_{jn}$.

O tempo total de sobreposição de todos os trens em todas as estações é expresso pela equação 79, considerando que $\Delta ta \cong \Delta tf$.

$$\Delta ts(ta, tf, i, n) = NT \cdot \Delta tf \cdot k - \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{n=1}^{N-1} \Delta ts1_n + \Delta ts2_n + \Delta ts1_{(n+1)} + \Delta ts2_{(n+1)} \quad (79)$$

5.1.6.2. Critério do tempo total de parada dos trens nas estações

Nesta pesquisa, o tempo total de parada dos trens nas estações é um dos critérios para avaliação da população. Desta forma, foi definido para o sentido de ida que quando $1 \leq i \leq NT$ e $1 \leq n \leq NE - 1$, o tempo de parada do trem na estação ta_n é determinado pela equação 80.

$$tp_T(n) = \sum_{k=1}^{NE} tp_n \quad (80)$$

No sentido de volta, quando o trem i chega à estação N , são alterados os tempos de parada nas estações. Portanto, para $N \leq n \leq 2NE - 2$, o tempo de parada do trem na estação tp_n é expresso pela equação 81.

$$tp_T(n) = \sum_{k=1}^{2NE} tp_n \quad (81)$$

O tempo total de parada do trem na estação para uma viagem completa do trem "i" da estação 1 até a estação $2N-1$ é expresso pela equação 82, para $t \in Tp_T$.

$$Tp_T(t) = \sum_{k=1}^{NE} \sum_{k=NE}^{2NE} tp_n(t) \quad (82)$$

De acordo com a equação (12), $Tp_T(t)$ define o tempo de parada de todos os trens em todas as estações.

A aptidão de um cromossomo S_i da população no algoritmo ACTREM é determinada pela equação 83.

$$f_i(S_i) = \Delta ts(ta, tf, i, n) + (k \cdot tp_{op} - Tp_T(t)) \quad (83)$$

Os pais da população são selecionados com probabilidade proporcional à sua aptidão. Portanto, a probabilidade de seleção d_i de um cromossomo S_i com aptidão f_i , é dada pela equação 84:

$$d_i = \frac{f_i(S_i)}{\sum_{k=1}^{2N} f_i(S_i)} \quad (84)$$

5.2. DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DE CONTROLE – ACTREM

No desenvolvimento do Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária – ACTREM - para melhoria da eficiência energética de sistemas de tração metroviária foi decidido utilizar os conceitos de algoritmos genéticos, devido a sua característica de combinar procedimentos de busca direcionada e aleatória, de modo a obter o ponto ótimo de uma determinada função, mesmo quando esta apresenta particularidades não lineares, múltiplos picos e descontinuidades.

Os algoritmos genéticos são compostos por populações, denominadas “indivíduos” ou “cromossomos”, que se comportam de forma análoga ao notado na evolução natural (GOLDBERG, 1989).

No ACTREM foram aplicados os conceitos do algoritmo genético para buscar os melhores tempos de paradas nas estações para os trens que circulam na linha em estudo.

Para o desenvolvimento de um modelo para otimização do diagrama horário do trem em tempo real, com a finalidade de aumentar a eficiência de energia no sistema de tração metroviária optou-se pela aplicação do conceito de AG. Abaixo, definem-se os termos:

- a) gene – representa o tempo de parada do trem em uma determinada estação da linha em estudo.
- b) cromossomo – é uma palavra composta por um conjunto de genes, em que cada posição, ao longo da palavra, corresponde ao tempo de parada de uma estação;
- c) indivíduo – solução completa com os tempos de parada na estação (genes) alocados no cromossomo, associada a duas variáveis adicionais. Uma delas é o fator de fitness (ff), que indica um índice de qualidade do cromossomo. A

outra variável de controle é o θ (o operador genético), que será utilizado pelo Julgador, para a criação da próxima geração de indivíduos;

- d) geração – conjunto de todos os indivíduos (ou todas as soluções) presentes em uma iteração do método.

A tabela 26 contém a definição dos termos da AG adotados para o desenvolvimento do algoritmo de controle ACTREM.

Tabela 26: Nomenclatura do AG

Terminologia do AG	Modelo
Gene	Tempo de parada na estação
Cromossomo	Conjunto de todos os tempos de parada nas estações da linha em estudo
Indivíduo	Uma solução completa, tempo de parada, resultado da função de avaliação e o operador genético a ser aplicado.
Geração	Conjunto de todos os indivíduos atualmente ativos

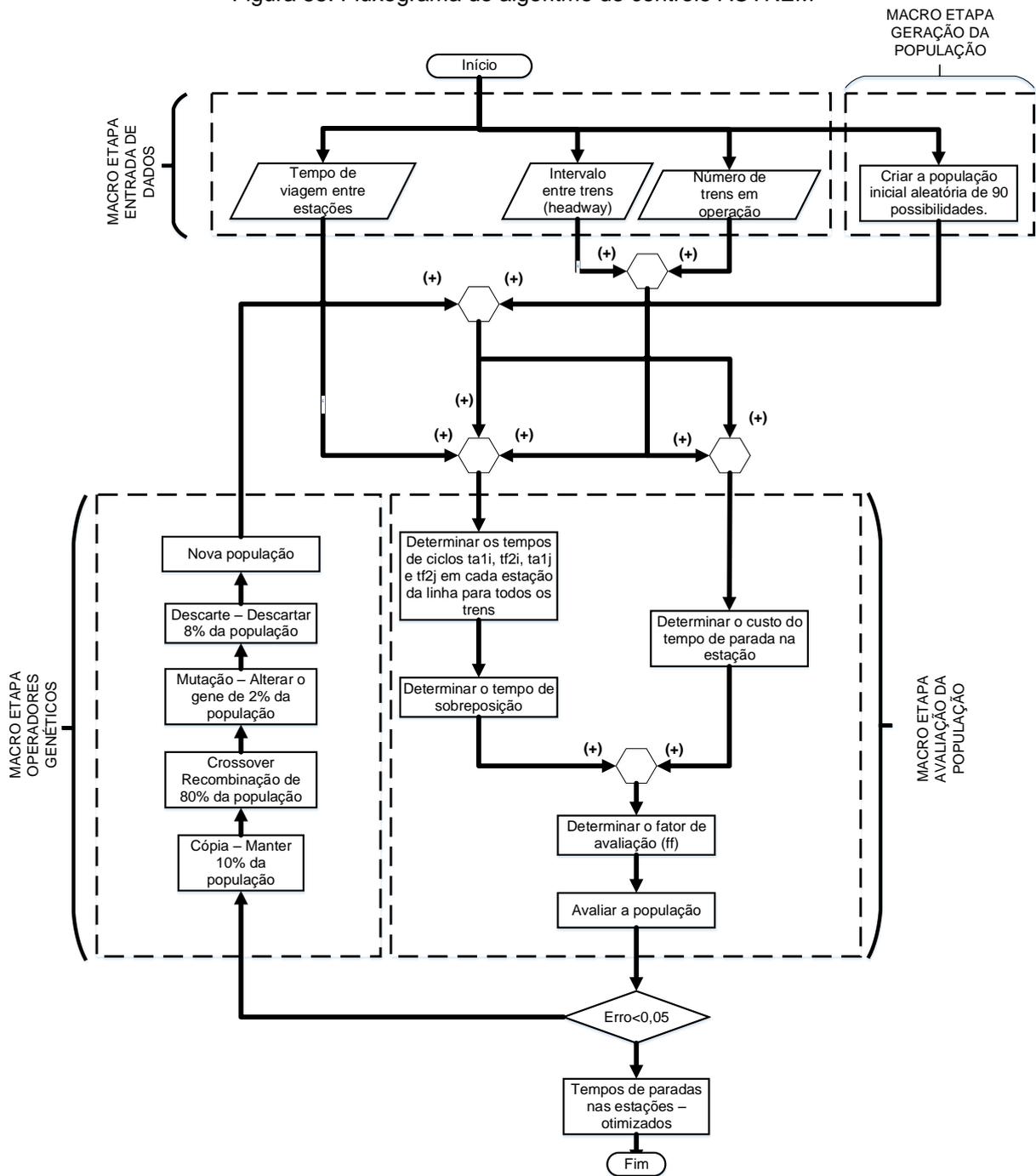
Fonte adaptada: (BURIAN, 2009)

O desenvolvimento do Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária – ACTREM foi dividido em 4 macroetapas:

- a) Macroetapa entrada de dados;
- b) Macroetapa geração da primeira população;
- c) Macroetapa avaliação da população;
- d) Macroetapa operadores genéticos.

A figura 55 mostra o fluxograma do algoritmo de controle ACTREM empregado neste trabalho de pesquisa. Foi utilizada a teoria de algoritmos genéticos para o desenvolvimento do algoritmo de controle ACTREM.

Figura 55: Fluxograma do algoritmo de controle ACTREM



Fonte: (Autor)

5.2.1. Macroetapa entrada e saída do algoritmo de controle ACTREM

Os dados de entrada utilizados na construção do algoritmo de controle ACTREM são compostos de três constantes:

- Intervalo entre trens “headway”- h , que na linha 4 – Amarela do metrô de São Paulo no horário de maior demanda de usuário é de 123 segundos;
- Tempo de parada operacional do trem na estação tp_{op} , que na linha 4 – Amarela do metrô de São Paulo é de 24 segundos;
- Número de trens em operação NT.

Também é composto pela matriz contendo os tempos de viagem entre estações tv_e , sendo sua estrutura mostrada na tabela 27. Os tempos na tabela 27 estão indicados por tv_{N1-N2} , onde o primeiro número N1 indica a estação de partida e o segundo número N2, a estação destino, exceto tv_{0-1} que indica o tempo de entrada na linha até a primeira estação.

Tabela 27: Dados de entrada dos tempos de viagem entre estações

1-10		11-20	
e	Sentido de ida	e	Sentido de volta
1	tv_0	12	t_t
2	tv_{1-2}	13	tv_{11-10}
3	tv_{2-3}	14	tv_{10-9}
4	tv_{3-4}	15	tv_{9-8}
5	tv_{4-5}	16	tv_{8-7}
6	tv_{5-6}	17	tv_{7-6}
7	tv_{6-7}	18	tv_{6-5}
8	tv_{7-8}	19	tv_{5-4}
9	tv_{8-9}	20	tv_{4-3}
10	tv_{9-10}	21	tv_{3-2}
11	tv_{10-11}	22	tv_{2-1}

Fonte: (Autor)

Os dados de saída compõem uma matriz contendo os tempos de parada na estação, para a melhoria da eficiência energética. A tabela 28 mostra a estrutura da matriz.

Tabela 28: Dados de saída do tempo de parada na estação

1-10		11-20	
k	Sentido de ida	k	Sentido de volta
1	tp_1	12	tp_{12}
2	tp_2	13	tp_{13}
3	tp_3	14	tp_{14}
4	tp_4	15	tp_{15}
5	tp_5	16	tp_{16}
6	tp_6	17	tp_{17}
7	tp_7	18	tp_{18}
8	tp_8	19	tp_{19}
9	tp_9	20	tp_{20}
10	tp_{10}	21	tp_{21}
11	tp_{11}	22	tp_{22}

Fonte: (Autor)

5.2.2. Macroetapa geração da população do algoritmo de controle ACTREM

Para implementar o AG, é necessário criar uma estrutura que armazene gerações completas de indivíduos, que possa classificá-los e, posteriormente, reproduzi-los.

Para a obtenção da primeira geração de indivíduos, é necessário definir a estrutura do cromossomo. Este é formado por uma sequência de genes, cujo tamanho varia de acordo com os números de estações. Cada cromossomo representa uma solução em potencial para o problema.

5.2.2.1. Estrutura do cromossomo do algoritmo de controle ACTREM

O cromossomo é formado por um conjunto de genes e cada gene representa uma variável da função que será otimizada.

No caso da otimização do controle de tráfego de trens da linha 4 Amarela, o cromossomo é composto por 22 genes que representam os tempos de parada nas estações $tp = (tp_1, tp_2, tp_3, tp_4, tp_5, tp_6, tp_7, tp_8, \dots, tp_{21}, tp_{22})$.

De modo geral, trata-se de otimizar uma função $f(tp)$ qualquer de k variáveis, conforme mostra a equação 85.

$$f(tp) = f(tp_1, tp_2, \dots, tp_{k-1}, tp_k) \quad (85)$$

sujeita a

$$tp_{k_{min}} < tp_k < tp_{k_{max}} \quad k = 1, 2, \dots, 2N \quad (86)$$

De acordo com as restrições descritas no item 5.1.4 e dos dados informados no item 5.2.1 a equação 86 pode ser reescrita.

$$18s < tp_k < 28s \quad k = 1, 2, \dots, 2NE \quad (87)$$

Desta maneira, cada sequência de k variáveis é denominada de cromossomo ou indivíduo (Haupt & Haupt, 1998) e cada uma das tp_k variáveis é um gene. Cada gene é representado no sistema binário, onde os bits 0 e 1 são alelos denominados de b_x .

O comprimento de cada gene depende da precisão requerida para o problema e da amplitude do intervalo onde ele está definido. O domínio de definição do gene tp_k é o intervalo (tp_{min}, tp_{max}) . Admitindo que a precisão do problema seja de “ p ” casas decimais, então o intervalo (tp_{min}, tp_{max}) deve ser dividido em $(tp_{max} - tp_{min}) \cdot 10^p$ subintervalos iguais, de acordo com a equação 88.

$$2^{m_i} > (tp_{max} - tp_{min}) \cdot 10^p \quad (88)$$

Portanto, o gene tp_k deverá ter, pelo menos m_i bits, conforme equação 120.

$$m_i > \frac{\log(tp_{max} - tp_{min}) \cdot 10^p}{\log 2} \quad (89)$$

Consequentemente, o comprimento do gene tp_k é a menor potência de 2 dentre aquelas em que 2^m supera $(tp_{max} - tp_{min}) \cdot 10^p$.

De acordo com a equação 87, admitindo que a precisão do problema de zero casa decimal, então o intervalo $(18s, 28s)$ deve ser dividido em $(22s - 18s) \cdot 10^0$ subintervalos iguais.

$$\begin{aligned} 2^{m_i} &> (28s - 18s) \cdot 10^0 \\ 2^{m_i} &> 10 \end{aligned} \quad (90)$$

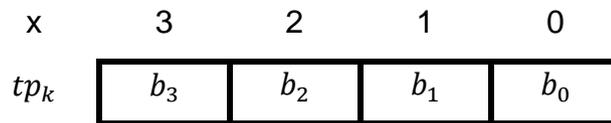
Portanto, o gene tp_k deverá ter, pelo menos, m_i bits.

$$m_i > \frac{\log(28s - 18s) \cdot 10^0}{\log 2} \quad (91)$$

$$m_i > 3,32 \text{ bit's}$$

De acordo com a equação 91, o tamanho do gene adotado nesta pesquisa é de 4 bits para cada tp_k , conforme ilustra a figura 56.

Figura 56: Representação do gene



Fonte: (Autor)

Para decodificar o gene tp_k , deve-se primeiro converter a sequência binária na base 2 para a base 10, conforme a equação 92:

$$tp_k = \sum_{x=0}^{XT} b_x \cdot 2^x \quad (92)$$

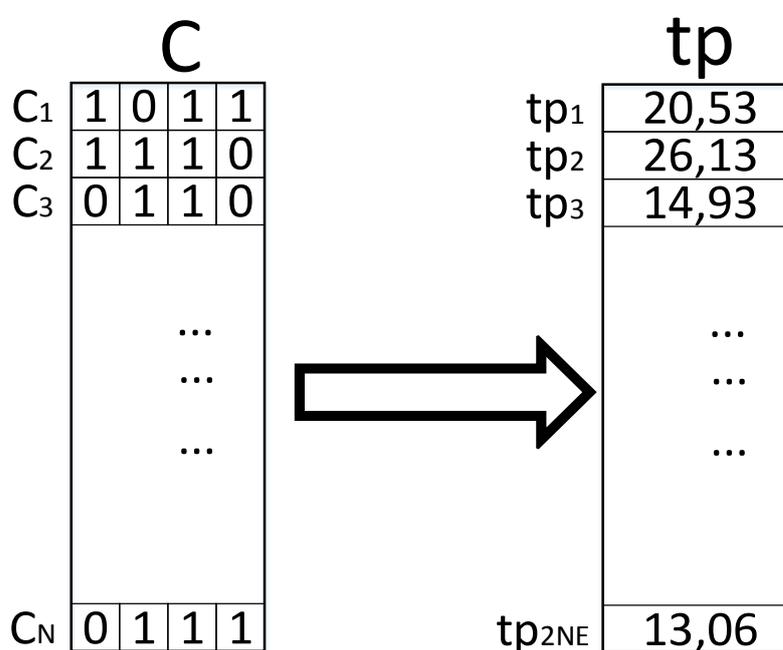
Como $tp_{k(10)}$ é um número no intervalo $[0, 2^{XT} - 1]$, onde XT é o tamanho da cadeia de bits, é necessário mapeá-lo para o intervalo do problema. Isto pode ser feito pela equação 93.

$$tp_k = tp_{min} + (tp_{max} - tp_{min}) \cdot \frac{tp_{k(10)}}{2^{XT} - 1} \quad (93)$$

O tamanho do cromossomo para execução na linha 4 – Amarela da cidade de São Paulo é determinado pelo produto do tamanho do gene que representa o tempo de parada, composto de 4 bits, e a quantidade de estações da linha em estudo, em número de 11. O cromossomo é composto de 88 bits.

A figura 57 ilustra a geração de um cromossomo, onde C é o cromossomo e C_k é o gene. O tp é o conjunto de tempos de parada do trem na estação onde tp_k é a decodificação dos genes C_k do cromossomo C , conforme a equação 91.

Figura 57: Geração do cromossomo



Fonte: (Autor)

5.2.3. Macroetapa avaliação da população do algoritmo de controle ACTREM

Para cada estação, escolhe-se uma representação de elemento, de maneira aleatória. Em seguida, é preciso averiguar se o tempo de parada na estação escolhida atende às restrições operacionais definidas no item 5.1.4.

Uma geração é composta por certo número de indivíduos, formados aleatoriamente. Nesta tese de doutorado, os cromossomos são compostos por uma sequência de k

caracteres, em que k é igual duas vezes o número de estações da linha em estudo. Cada posição é a representação de um tempo de parada na estação.

Após criar cada cromossomo, chega-se à tabela 27, com os cromossomos da primeira geração, representando em hexadecimal os 88 bit's do cromossomo. Os dados apresentados são resultado de uma execução do algoritmo ACTREM; a cada execução o algoritmo gera uma nova população.

Tabela 29: Cromossomo com tempo de parada nas estações – Primeira Geração

1 - 30		31 - 60		61 - 90	
nº	Indivíduo	nº	Indivíduo	nº	Indivíduo
1	A8CB2F8E1CCD6D50A54D71	31	265DB324E0B51AF739B638	61	2E0E1AA90E4AC9E67748A8
2	5F1EB0DD6E187175E0E730	32	8399FD4912D15032EA0277	62	688B04CC1B99DC6A3F4AB9
3	5FF6280F6666D946BAAD8C	33	AA197726D2D5CC7690289A	63	DFFC611A40559E59596FE3
4	DF147944902E956A79D974	34	1311F74E36067DF9E4D68B	64	739505B6966C1C05FB6F58
5	CC98ED4416A0783E29A621	35	E4E8C8693D2D24CD6A3919	65	9E9A294C5E6822EE1D3285
6	5F65EA44CFE93D7311173F	36	7AB93AFF6F495A18E71505	66	01FA29D489FD493A0AD60A
7	9A4754B4B7F4922D5289BD	37	EE1B2E4073F89839E845AA	67	ED12CB60267DF72AB604B6
8	D5F8FF00AAD01C32389B99	38	9C9976CAEDFA43523B7A2C	68	E247E3DFA7666DE8739024
9	486D695D4F2F8386DA6241	39	B198787415B5B0466ED1BE	69	22A9C7E9E0D7CFD149F4D0
10	8CB3EC8DA0D178AEA06907	40	AD7C9F1243B02CEC643870	70	351BE285920E2887830F54
11	2ACF7CAD2B38BD59AB0A25	41	EE70CC40DB1508C9AD9F96	71	6BCB05F13FF17540373C28
12	20CD1DF5A3FF2D135C914F	42	371CEE2C14429C622B0338	72	70542268EF8EAC51BDB6EF
13	68FA3688E561C400E0B353	43	388C7656472A52567E3B93	73	C7BA9BF1B086C4D224CF63
14	83DB4E3778BFA81FAD4E50	44	1774D561F5DDAD928C23AF	74	5D2ED41F97BBBF85D9F03F
15	FEC25E48D11C3003EAFE73	45	F79C0AD8571D51EC0C0D80	75	0964D0DC899AAEEDF571C5
16	FBA56F44859DEC0712884F	46	800F0AF2B0CB0DC0D60419	76	19EA723334BBBCE6EB39D2
17	BAF505B8AC1EADC66A053B	47	66D8605FC276DFF5B0666A	77	D90E43156C5936F6D53A7E
18	2182B303138B8FA15CEEC6	48	F5E6810F5FB800548B439C	78	1765B42292E892DC2D2FD0
19	41D78A18EE76FE383EECBD	49	95B287F7CAECE8BB2696EA	79	B213C073945476FC24B3FF
20	E34A994D2DA0BDAA8D01B8	50	534675DED815B7970C31A	80	1B7F7B5F80DBC3D12FA5C6
21	0AF7801CCA5CF59594F4BE	51	6873D9213C866CA040F579	81	E3FA6D44473D9AB9865EC5
22	8234D5F131303472E1247B	52	C53A547AEF398A1F8D3A76	82	4017174FCF786635A831F5
23	617ABCECEC477C66CE8AFD	53	95FDEECF6D7780E527F93C	83	921F8C46B516E2C6DFC72C
24	942953B09DE1468EE7AE8D	54	CD5DD2F150428A2B1ABD6C	84	F1DBEA4DA1D8257DAEBB2A
25	651F4B253AEE8F208C538A	55	AA4A966AEE414E264441D8	85	B438BFAFB819A3F856173F
26	02504C42458BDA97617CE1	56	416CE5450639EEC4AAD9DD	86	F38DAAA71D5C3EF1749080
27	093B8ED617633ED3BB4311	57	045BE6CFE99E100C382841	87	1653D42644BF470E57A285
28	0AE23B4F7C4B6B494D7A34	58	4AE3C66B36FCDE38F91F24	88	59CC569E699E860D90EF40
29	15AE12830CCEB00D7D26AC	59	D8CC344E0490179BE7D407	89	5776E2C799D0480581F7D7
30	3E77CC76588406D5FC3CD3	60	674EE64E3AA5132914ACDB	90	8E682569407560F2BF1CA2

Fonte: (Autor)

Nesta tese de doutorado foi adotada uma população inicial de 90 elementos; após simulações com populações de 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 210, foi possível verificar que populações a partir de 90 elementos tinham resultados próximos para o controle de tração.

5.2.3.1. Fator de fitness do algoritmo de controle ACTREM

Nesta etapa é aplicada a função de avaliação dos indivíduos da população. Esta, por sua vez, determina o fator de qualidade dos cromossomos, a partir de seus genes (elementos formadores), associando uma nota ao indivíduo. É o chamado “fator de fitness (ff)”.

A função de avaliação da população julga a qualidade de cada indivíduo, sem adicionar qualquer tipo de informação a respeito das técnicas de resolução do problema em questão (LINDEN, 2008).

O fator de fitness é a função do algoritmo de controle ACTREN para encontrar uma configuração equilibrada entre os valores do tempo de sobreposição do ciclo de aceleração e do ciclo de frenagem com os valores do tempo do total do ciclo de viagem. Assim, é pertinente tecer as considerações que se seguem, acerca da implementação do Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária – ACTREM.

À medida que o simulado calcula o trajeto percorrido pelos trens, calculam-se dois componentes relevantes do fator de fitness (ff):

- a) O Δt_s tempo de sobreposição dos ciclos de aceleração e de frenagem, definido aplicando a equação 77;
- b) O t_{p_T} tempo total de parada dos trens nas estações para uma viagem completa, definido pela equação 80;

O fator de fitness (ff) de um indivíduo no Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária – ACTREM, é dado pela equação 94:

$$ff = \Delta ts(a, f) - (Tp_T(t) - k \cdot tp_{op}) \quad (94)$$

Onde ff é fator de fitness, $\Delta ts(a, f)$ é o somatório de todos os tempos de sobreposição dos ciclos de aceleração e frenagem, $Tp_T(t)$ é o somatório de todos os tempos de paradas otimizados pelo algoritmo de controle ACTREM, k é o número de paradas do trem e tp_{op} é o tempo de parada na estação operacional sem a atuação do algoritmo de controle ACTREM.

Segundo (LÊNIN, 2006), o AG pode ser usado para descobrir o ponto máximo de toda e qualquer função de n variáveis, sem nenhuma alteração das estruturas de dados e procedimentos adotados. A Tabela 28 apresenta uma geração de cromossomos com seus respectivos fatores de fitness, resultado de uma execução do algoritmo ACTREM.

Tabela 30: Cromossomo com tempo de parada nas estações e fator de fitness

nº	1 - 45		nº	46 - 90	
	Indivíduo	ff		Indivíduo	ff
1	A8CB2F8E1CCD6D50A54D71	329,88	46	800F0AF2B0CB0DC0D60419	246,46
2	5F1EB0DD6E187175E0E730	603,56	47	66D8605FC276DFF5B0666A	442,18
3	5FF6280F6666D946BAAD8C	16,48	48	F5E6810F5FB800548B439C	306,57
4	DF147944902E956A79D974	599,61	49	95B287F7CAECE8BB2696EA	257,5
5	CC98ED4416A0783E29A621	364,36	50	534675DEDF815B7970C31A	67,72
6	5F65EA44CFE93D7311173F	139,18	51	6873D9213C866CA040F579	185,44
7	9A4754B4B7F4922D5289BD	581,27	52	C53A547AEF398A1F8D3A76	205,12
8	D5F8FF00AAD01C32389B99	217,79	53	95FDEECF6D7780E527F93C	405,04
9	486D695D4F2F8386DA6241	583,46	54	CD5DD2F150428A2B1ABD6C	619,69
10	8CB3EC8DA0D178AEA06907	204,78	55	AA4A966AEE414E264441D8	322,22
11	2ACF7CAD2B38BD59AB0A25	290,04	56	416CE5450639EEC4AAD9DD	141,6
12	20CD1DF5A3FF2D135C914F	469,33	57	045BE6CFE99E100C382841	319,23
13	68FA3688E561C400E0B353	219,73	58	4AE3C66B36FCDE38F91F24	101,56
14	83DB4E3778BFA81FAD4E50	321,09	59	D8CC344E0490179BE7D407	175,7
15	FEC25E48D11C3003EAFE73	13,87	60	674EE64E3AA5132914ACDB	303,22
16	FBA56F44859DEC0712884F	126,25	61	2E0E1AA90E4AC9E67748A8	545,34
17	BAF505B8AC1EADC66A053B	38,97	62	688B04CC1B99DC6A3F4AB9	341,06
18	2182B303138B8FA15CEEC6	429,06	63	DFFC611A40559E59596FE3	521,37
19	41D78A18EE76FE383EECBD	113	64	739505B6966C1C05FB6F58	457,93
20	E34A994D2DA0BDAA8D01B8	595,68	65	9E9A294C5E6822EE1D3285	600,09

Continua

Continuação

1 - 45			46 - 90		
nº	Indivíduo	ff	nº	Indivíduo	ff
21	0AF7801CCA5CF59594F4BE	569,13	66	01FA29D489FD493A0AD60A	369,48
22	8234D5F131303472E1247B	154,48	67	ED12CB60267DF72AB604B6	403,16
23	617ABCECEC477C66CE8AFD	569,2	68	E247E3DFA7666DE8739024	348,13
24	942953B09DE1468EE7AE8D	5,42	69	22A9C7E9E0D7CFD149F4D0	366,47
25	651F4B253AEE8F208C538A	424,3	70	351BE285920E2887830F54	309,69
26	02504C42458BDA97617CE1	538,97	71	6BCB05F13FF17540373C28	18,74
27	093B8ED617633ED3BB4311	363,91	72	70542268EF8EAC51BDB6EF	148,52
28	0AE23B4F7C4B6B494D7A34	83,6	73	C7BA9BF1B086C4D224CF63	436,31
29	15AE12830CCEB00D7D26AC	211,97	74	5D2ED41F97BBBF85D9F03F	215,44
30	3E77CC76588406D5FC3CD3	531,24	75	0964D0DC899AAEEDF571C5	627,3
31	265DB324E0B51AF739B638	72,54	76	19EA723334BBBCE6EB39D2	114,9
32	8399FD4912D15032EA0277	157,71	77	D90E43156C5936F6D53A7E	564,23
33	AA197726D2D5CC7690289A	561,54	78	1765B42292E892DC2D2FD0	392,21
34	1311F74E36067DF9E4D68B	141,47	79	B213C073945476FC24B3FF	395,99
35	E4E8C8693D2D24CD6A3919	540,11	80	1B7F7B5F80DBC3D12FA5C6	179,49
36	7AB93AFF6F495A18E71505	165,2	81	E3FA6D44473D9AB9865EC5	102,03
37	EE1B2E4073F89839E845AA	310,22	82	4017174FCF786635A831F5	139,03
38	9C9976CAEDFA43523B7A2C	429,15	83	921F8C46B516E2C6DFC72C	595,5
39	B198787415B5B0466ED1BE	335,48	84	F1DBEA4DA1D8257DAEBB2A	60,86
40	AD7C9F1243B02CEC643870	622,91	85	B438BF8FB819A3F856173F	373
41	EE70CC40DB1508C9AD9F96	624,06	86	F38DAAA71D5C3EF1749080	459,63
42	371CEE2C14429C622B0338	324,85	87	1653D42644BF470E57A285	98,87
43	388C7656472A52567E3B93	387,26	88	59CC569E699E860D90EF40	524,88
44	1774D561F5DDAD928C23AF	387,84	89	5776E2C799D0480581F7D7	220,24
45	F79C0AD8571D51EC0C0D80	346,45	90	8E682569407560F2BF1CA2	634,17

Fonte: (Autor)

5.2.4. Macroetapa operadores genéticos do algoritmo de controle ACTREM

Aplicam-se à população os denominados “operadores genéticos”, como a recombinação, a mutação e outros. Nesta conjunção, cada novo indivíduo recebe uma avaliação, caracterizando um fator de qualidade, cuja explicação está relacionada ao conceito de sua adequação ao meio ambiente. Os pesos destas avaliações são definidos por regras, o que é uma propriedade representativa, quando se procura a solução de um problema.

Este fator de qualidade, também denominado “fator de fitness”, é determinado pela adequação do indivíduo, ao se encontrar com situações presentes na natureza. Tal fator representa a distinção entre aqueles que concorrem para alcançar suas metas de vida e a multiplicação de seus genes para as próximas gerações. Assim, cada indivíduo, qualificado por seu cromossomo, recebe uma nota de avaliação, fator de fitness, que é uma quantificação da sua qualidade. A partir deste ponto, serão aplicados os operadores genéticos diretamente no cromossomo, possibilitando que o indivíduo mais apto se sobressaia sobre os demais (LINDEN, 2008).

Para atingir estes objetivos, inicialmente gera-se a população inicial, ou seja, um conjunto inicial de strings, denominados em AG de cromossomos; essa é, comumente, estabelecida de modo aleatório. Em seguida, as populações evoluem em gerações, basicamente por meio de quatro operadores (KAGAN, et al., 2009):

- a) Cópia;
- b) Cruzamento (Crossover);
- c) Mutação;
- d) Descarte.

Os operadores genéticos considerados são apresentados na Tabela 29. Nesta, a coluna que indica a porcentagem de cada operação (% na Geração) baseia-se em (HETEM et. al.,2007), (FLAKE,1998), (GOLDBERG,1989) e (ROJAS et. al.,2008).

Tabela 31: Descrição dos operadores genéticos utilizados

Operador	Símbolo (S)	% no ACTREM
Cópia	e	10
Crossover (Recombinação)	c	80
Mutação	x	2
Descarte	k	18

Fonte: (Autor)

A Tabela 30 contém exemplos de cromossomos com seus respectivos fatores de fitness e os operadores genéticos associados. Os dados apresentados são resultado de uma execução do algoritmo ACTREM.

Tabela 32: Cromossomo com tempo de parada nas estações e fator de fitness e operadores genéticos - mutação (x)

1 - 45				46 - 90			
nº	Indivíduo	ff	S	nº	Indivíduo	ff	S
1	A8CB2F8E1CCD6D50A54D71	329,88	e	46	F79C0AD8571D51EC0C0D80	246,46	c
2	5F1EB0DD6E187175E0E730	603,56	x	47	800F0AF2B0CB0DC0D60419	442,18	e
3	5FF6280F6666D946BAAD8C	16,48	c	48	66D8605FC276DFF5B0666A	306,57	c
4	DF147944902E956A79D974	599,61	c	49	F5E6810F5FB800548B439C	257,5	c
5	CC98ED4416A0783E29A621	364,36	c	50	95B287F7CAECE8BB2696EA	67,72	c
6	5F65EA44CFE93D7311173F	139,18	c	51	534675DEDF815B7970C31A	185,44	x
7	9A4754B4B7F4922D5289BD	581,27	e	52	6873D9213C866CA040F579	205,12	c
8	D5F8FF00AAD01C32389B99	217,79	c	53	C53A547AEF398A1F8D3A76	405,04	c
9	486D695D4F2F8386DA6241	583,46	k	54	95FDEECF6D7780E527F93C	619,69	c
10	8CB3EC8DA0D178AEA06907	204,78	c	55	CD5DD2F150428A2B1ABD6C	322,22	c
11	2ACF7CAD2B38BD59AB0A25	290,04	c	56	AA4A966AEE414E264441D8	141,6	c
12	20CD1DF5A3FF2D135C914F	469,33	c	57	416CE5450639EEC4AAD9DD	319,23	c
13	68FA3688E561C400E0B353	219,73	c	58	045BE6CFE99E100C382841	101,56	c
14	83DB4E3778BFA81FAD4E50	321,09	c	59	4AE3C66B36FCDE38F91F24	175,7	c
15	FEC25E48D11C3003EAFE73	13,87	c	60	D8CC344E0490179BE7D407	303,22	c
16	FBA56F44859DEC0712884F	126,25	c	61	2E0E1AA90E4AC9E67748A8	545,34	c
17	BAF505B8AC1EADC66A053B	38,97	x	62	2E0E1AA90E4AC9E67748A8	341,06	e
18	2182B303138B8FA15CEEC6	429,06	c	63	688B04CC1B99DC6A3F4AB9	521,37	c
19	41D78A18EE76FE383EECBD	113	c	64	DFFC611A40559E59596FE3	457,93	c
20	E34A994D2DA0BDAA8D01B8	595,68	c	65	739505B6966C1C05FB6F58	600,09	c
21	0AF7801CCA5CF59594F4BE	569,13	c	66	9E9A294C5E6822EE1D3285	369,48	c
22	8234D5F131303472E1247B	154,48	e	67	01FA29D489FD493A0AD60A	403,16	c
23	617ABCECEC477C66CE8AFD	569,2	c	68	ED12CB60267DF72AB604B6	348,13	c
24	942953B09DE1468EE7AE8D	5,42	c	69	E247E3DFA7666DE8739024	366,47	c
25	651F4B253AEE8F208C538A	424,3	c	70	22A9C7E9E0D7CFD149F4D0	309,69	c
26	02504C42458BDA97617CE1	538,97	c	71	351BE285920E2887830F54	18,74	x
27	093B8ED617633ED3BB4311	363,91	c	72	6BCB05F13FF17540373C28	148,52	c
28	0AE23B4F7C4B6B494D7A34	83,6	c	73	70542268EF8EAC51BDB6EF	436,31	c
29	15AE12830CCEB00D7D26AC	211,97	c	74	C7BA9BF1B086C4D224CF63	215,44	c
30	3E77CC76588406D5FC3CD3	531,24	c	75	5D2ED41F97BBBF85D9F03F	627,3	c
31	265DB324E0B51AF739B638	72,54	e	76	0964D0DC899AAEEDF571C5	114,9	c
32	265DB324E0B51AF739B638	157,71	c	77	19EA723334BBBCE6EB39D2	564,23	c
33	8399FD4912D15032EA0277	561,54	x	78	D90E43156C5936F6D53A7E	392,21	c
34	AA197726D2D5CC7690289A	141,47	c	79	1765B42292E892DC2D2FD0	395,99	c
35	1311F74E36067DF9E4D68B	540,11	c	80	B213C073945476FC24B3FF	179,49	x
36	E4E8C8693D2D24CD6A3919	165,2	c	81	1B7F7B5F80DBC3D12FA5C6	102,03	c
37	7AB93AFF6F495A18E71505	310,22	e	82	E3FA6D44473D9AB9865EC5	139,03	c

Continua

Continuação

1 - 45				46 -90			
nº	Indivíduo	ff	S	nº	Indivíduo	ff	S
38	EE1B2E4073F89839E845AA	429,15	c	83	4017174FCF786635A831F5	595,5	c
39	9C9976CAEDFA43523B7A2C	335,48	c	84	921F8C46B516E2C6DFC72C	60,86	k
40	B198787415B5B0466ED1BE	622,91	c	85	F1DBEA4DA1D8257DAEBB2A	373	x
41	AD7C9F1243B02CEC643870	624,06	c	86	B438BF819A3F856173F	459,63	e
42	EE70CC40DB1508C9AD9F96	324,85	c	87	F38DAAA71D5C3EF1749080	98,87	c
43	371CEE2C14429C622B0338	387,26	c	88	1653D42644BF470E57A285	524,88	c
44	388C7656472A52567E3B93	387,84	e	89	59CC569E699E860D90EF40	220,24	c
45	1774D561F5DDAD928C23AF	346,45	c	90	5776E2C799D0480581F7D7	634,17	c

Fonte: (Autor)

5.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após um número elevado de simulações, observa-se que os resultados dos tempos de parada na estação convergem. Nota-se, também, que a solução otimizada apresenta um pequeno aumento da capacidade de transporte de usuários do sistema.

A partir da solução otimizada, obteve-se a tabela 28 que mostra o resultado da utilização do algoritmo de controle ACTREM. Os resultados obtidos foram comparados com os dados da tabela 31, obtidos pela simulação da tração.

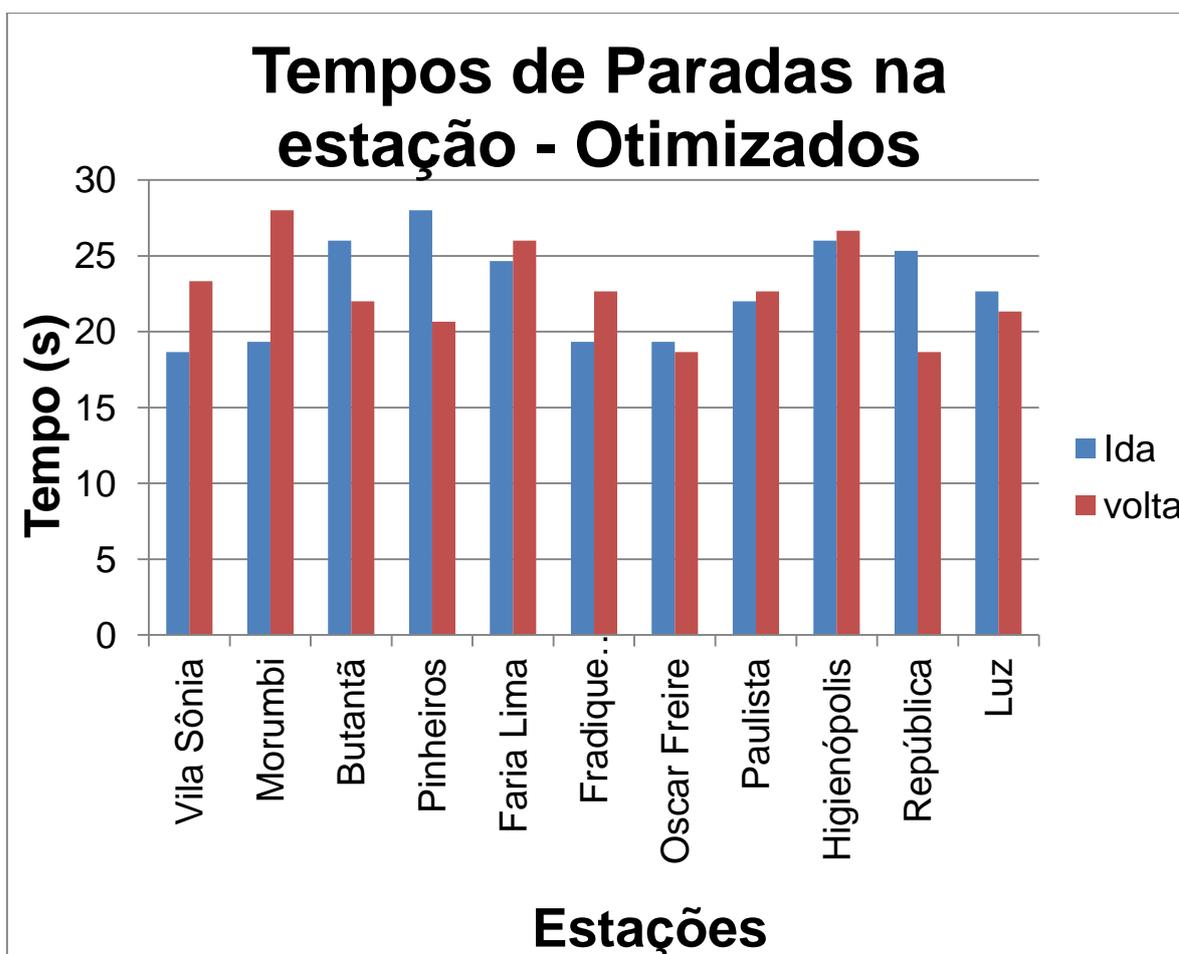
Tabela 33: Energias geradas e consumidas na linha 4 - amarela

Subestação retificadora	Energia consumida	Energia de frenagem disponível		Energia de frenagem reaproveitada – sem algoritmo		Energia de frenagem reaproveitada– com algoritmo	
	[kWh]	[kWh]	[%]	[kWh]	[%]	[kWh]	[%]
Pátio Vila Sônia	5526,31	2616,1	100	922,94	35,28	1498,83	57,29
Capengue	5967,14	2824,8	100	996,85	35,29	1329,63	47,07
Pinheiros	6643,73	3145	100	1080	34,34	1828,47	58,14
Fradique Coutinho	6897,05	3265	100	1121,2	34,34	1479,23	45,31
Paulista	7089,85	3356,2	100	1120	33,37	2249,36	67,02
República	5611,09	2656,2	100	886,11	33,36	1493,72	56,24
Luz	4746,74	2247	100	751,85	33,46	998,81	44,45

Fonte: (Autor)

Constata-se que a solução otimizada é atingida por volta da 22ª geração; em alguns casos, a convergência ocorre a partir da 12ª geração; em outros, em torno da 42ª. Entretanto, a solução final sempre resulta na solução otimizada, evidenciando-se a característica convergente do AG. O resultado final é apresentado na figura 58.

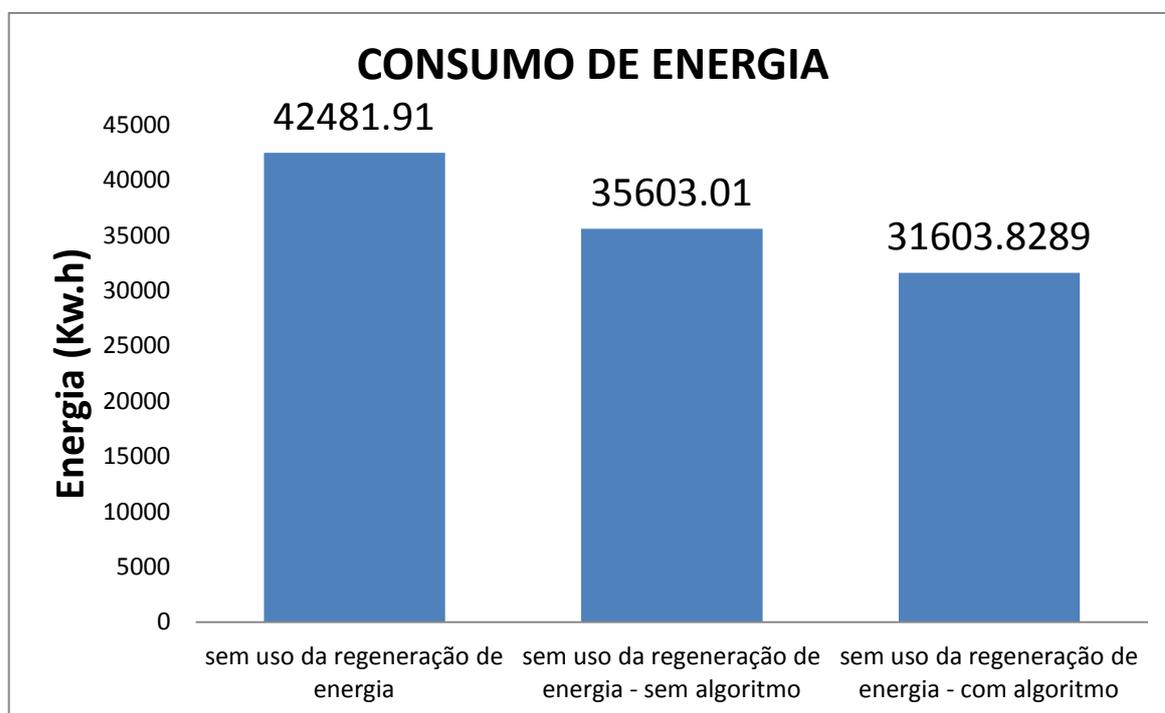
Figura 58: Tempos de paradas na estação - Otimizados



Fonte: (Autor)

Com a utilização do algoritmo de controle ACTREM obteve-se uma redução de energia de 9,5%; sem o algoritmo, 16,16% da energia consumida era proveniente da energia de frenagem. Com a utilização do algoritmo de controle, este valor aumentou para 25,6%, conforme ilustra a figura 59, para o período de uma hora no horário de pico.

Figura 59: Comparação do consumo de energia.



Fonte: (Autor)

Considerando a linha com 11 estações e 19 trens circulando no horário de picos e 12 trens no horário de vale, o consumo de energia elétrica simulado da linha 4 – Amarela no período de um mês é:

- a) 15.065 MWh/mês sem a utilização o algoritmo de controle ACTREM
- b) 13.373 MWh/mês com a utilização do algoritmo de controle ACTREM

Analisando o custo do consumo de energia elétrica na linha 4 – Amarela, com o valor do kWh em São Paulo de R\$0,07091 e sem incluir os custos referente a demanda contratada, pode-se afirmar que:

- a) O custo mensal com consumo de energia com a utilização do algoritmo de controle ACTREM será de R\$ 1.068.308,11.
- b) O custo mensal com consumo de energia com a utilização do algoritmo de controle ACTREM será de R\$948.283,60.

Podemos afirmar que com a utilização do algoritmo de controle ACTREM é possível obter uma redução do custo mensal com o consumo de energia elétrica de R\$120.024,00.

Outro benefício gerado pela utilização do algoritmo de controle ACTREM é a redução da emissão de CO_2 . Considerando que a matriz de energia elétrica brasileira tem um fator de emissão $125\text{ gCO}_{2eq}/kWh$ (MIRANDA, 2012) é possível garantir que na linha 4 – Amarela:

- a) Sem a utilização do algoritmo de controle ACTREM gera mensalmente 1883t de CO_2 .
- b) Com a utilização do algoritmo de controle ACTREM gera mensalmente 1671t de CO_2 .

Pode-se afirmar que com a utilização do ACTREM gera-se uma redução emissão de CO_2 mensal de 212t.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho de pesquisa de doutorado comprovou que o desenvolvimento de Algoritmo de Controle de Tração para Regeneração de Energia Metroviária – ACTREM aumenta a utilização da frenagem regenerativa dos trens como resultado aumenta a eficiência energética de sistemas de tração metroviária.

Para desenvolvimento do Algoritmo de Controle ACTREM, foi necessário realizar:.

- a) A geração de um modelo matemático do consumo de uma linha de metrô, este modelo foi validado por meio de medições em campo dos valores de tensão, corrente e energia consumida nas subestações e trens da linha 4 – Amarela do metrô da cidade de São Paulo.
- b) A criação de uma metodologia para desenvolver um simulador para o sistema de tração metroviário, simulador que foi utilizado para as análises do desempenho do algoritmo de controle ACTREM.
- c) O desenvolvimento do algoritmo de controle ACTREM para aumento da eficiência energética, aplicando as teorias de algoritmos genéticos.

A escolha de implementar o algoritmo de controle ACTREM utilizando os conceitos de algoritmos genéticos justifica-se por suas características de:

- a) Ser um algoritmo robusto no tratamento dos dados e informações específicas relacionadas com o problema;
- b) É um método iterativo e possui alguma inteligência no processo de busca por soluções que não param no primeiro ótimo local encontrado.

Foram realizadas 15 simulações para determinar a eficiência do algoritmo proposto com base nos dados do metrô da linha 4 – Amarela da cidade de São Paulo. Os resultados mostram que o algoritmo proposto pode economizar 9,5% da energia e não provocar impactos relevantes na capacidade de transporte de passageiros do sistema.

Analisando os resultados da simulação da aplicação do Algoritmo de controle ACTREM na linha 4 amarela é possível afirmar que a utilização do ACTREM é viável. Os principais resultados são.

- a) Redução de 9,5% da energia consumida;
- b) Redução do custo anual com consumo de energia de R\$1.440.288,00;
- c) Redução anual da emissão de 2.544t de CO_2 .

As simulações da aplicação do algoritmo de controle ACTREM demonstraram a eficiência para gerar, automaticamente, os diagramas horários otimizados para uma economia de energia nos sistemas metroviários, levando em consideração as restrições operacionais do sistema, como capacidade máxima de cada trem, tempo total de espera, tempo total de viagem e intervalo entre trens.

A principal contribuição deste trabalho foi propor um novo algoritmo de controle denominado ACTREM que otimiza a utilização da energia proveniente das frenagens dos trens, sem acarretar impactos relevantes na capacidade de transporte de passageiros do sistema.

Os resultados sugerem possíveis continuidades do trabalho e a expansão de suas funcionalidades. Como sugestão para estudos futuros e melhoria do algoritmo pode-se:

- a) estudar a utilização de um algoritmo de controle para recuperação de energia que controle, também, o tempo de viagem entre estações;
- b) considerar a economia de energia em todo o sistema de fornecimento de energia, incluindo as perdas de transmissão e a eficiência dos retificadores nas subestações;
- c) melhorar o desenvolvimento do simulador para diminuição dos erros de cálculo.
- d) estudar os requisitos de processamento para aplicação do ACTREM em uma linha de metrô no Brasil.

e) desenvolver uma interface gráfica para o algoritmo de controle ACTREM

REFERÊNCIAS

- ALLÈGRE, A. L., BOUSCAYROL, A., DELARUE, P. & BARRADE, P., 2010. Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 4001-4012.
- APTA, 2009. *Public Transportation Saves Energy and Helps Our Environment*, s.l.: s.n.
- B. Mao, W. J. S. C. J. L., 2007. A computer-aided multi-train simulator for rail traffic. *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, pp. 1-5, 13-15.
- BARRERO, R., TACKOEN, X. & VAN MIERLO, J., 2010. Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, p. 207–225.
- BIM, E., 2009. *Máquinas elétricas e acionamentos*. s.l.:Elsevier.
- BOIZUMEAU, J. R., LEGUAY, P. & NAVARRO, E., 2011. Braking energy recovery at the Rennes metro. *Workshop on Braking Energy Recovery Systems – Ticket to Kyoto Project, Bielefeld, Germany*.
- BURIAN, R., 2009. *Algoritmos genéticos na alocação de dispositivos de proteção de distribuição de energia elétrica*. São Paulo: Universidade de São Paulo.
- CABRITA, C. M. P., 2000. Princípios fundamentais da tracção eléctrica. *eletricidade*, março.pp. 69-81.
- CHYMER, M., RENFREW, A. & BARNES, M., 2008. Analyzing the potential of energy storage on electrified transit systems. *8th World Congress of Railway Research – WCRR 2008, Seoul, South Korea*.
- CICCARELLI, F., IANNUZZI, D. & TRICOLI, P., 2012. Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, p. 36–49.
- CURTIUS, E. W. & KNIFFLER, 1950. *A. Neue Erkenntnisse über die Haftung zwischen Treibrad und Schiene*. s.l.:Elektrische Bahnen.
- DAVIS JR, W. J., 1926. The tractive resistance of electric locomotive and cars. *General Electric Review*, outubro, Volume 29, pp. 685-707.
- DE CASTRO, F. E. B. & ALOUCHE, P. L., 1981. Planejamento e dimensionamento da eletrificação em sistemas de transporte de massa.. *Engenharia – Revista do Instituto de Engenharia*, pp. 52-60.
- DECOTTIGNIES, P., 2005. *O motor assíncrono na tração eléctrica*. 1º ed. São Paulo: s.n.

DELATTRE, D. & SEILER, W., 1983. Electrification of a urban transit system.. *Revue Générale des Chemins de Fer*, pp. 430-436.

DOMÍNGUEZ, M., CUCALA, A. P., FERNÁNDEZ, A. & PECHARROM, 2011. Energy efficiency on train control design of metro ATO driving and impact of energy accumulation devices. *9th World Congress on Railway Research – WCRR 2011*.

EN50163:2004, 2005. *Railway applications. Supply voltages of traction systems*, s.l.: s.n.

EPE, 2013. *Resenha mensal do mercado de energia elétrica*, s.l.: s.n.

GOLDBERG, D. E., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. New York: ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, INC..

GONZALEZ-GIL, A., PALACIN, R., BATTY, P. & POWELL, J. P., 2014. Energy-efficient urban rail systems: strategies for an optimal management of regenerative braking energy. *Transport Research Arena (TRA) 2014 Proceedings*, abril, p. 9.

GOODMAN, C. J., SIU, L. K. & HO, T. K., 1998. A review of simulation models for railway systems. *International conference on Developments in Mass Transit Systems*, abril, pp. 80-85.

GUZZELLA, L. & SCIARRETTA, A., 2007. *Vehicle Propulsion Systems, Introduction to Modeling and Optimization*. 2 ed. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.

Haupt, R. L. & Haupt, S. E., 1998. *Practical genetic algorithms*. 2º ed. USA: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION.

HILLMANSEN, S. & ROBERTS, C., 2006. Energy Storage Devices In Hybrid Railway Vehicles: A Kinematic Analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers , Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, pp. 135 -143.

HULL, G. J., 2009. *Simulation of energy efficiency improvements on commuter railways*, Birmingham: s.n.

IEEE-1474.1, 2011. *IEEE-1474.1-2011 - IEEE Standard for Communication Based Train Control Performance Requirements and Functional Requirements*. s.l.:IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS.

IEEE-1474.2, 2003. *IEEE-1474.2-2003 - IEEE Standard for User Interface Requirements in Communications-Based Train Control (CBTC) Systems*. s.l.:s.n.

IEEE-1474.3, 2008. *IEEE-1474.3-2008 - IEEE Recommended Practice for Communications-Based Train Control (CBTC) System Design and Functional Allocations*. s.l.:s.n.

JIA, W. et al., 2008. A heuristic algorithm for fixed train runtime. *International Conference on Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age*, pp. 1 –7, 25-28.

- KAGAN, N., SCHMIDT, H. P., BARIONI, C. C. & KAGAN, H., 2009. *Métodos de Otimização Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência*. 1º ed. São Paulo: Blucher.
- KALLER, R. & ALLENBACH, J. –, 1995. *Traction électrique*. 1 ed. Lausanne: Presses Universitaires Romandes.
- KIEßLING, F., PUSCHMANN, R. & SCHMIEDER, A., 2001. *Contact lines for electric railways: planning, design, implementation..* 1º ed. Munich: Publicis Kommunikations Agentur.
- LINDEN, R., 2008. *Algoritmos genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional..* 2º ed. Rio de Janeiro: BRASPORT Livros e Multimídia Ltda.
- LIU, W., LI, Q. & TANG, B., 2009. Energy saving train control for urban railway train with multi-population genetic algorithm. *International forum on information technology and applications*, pp. 58-63.
- LU, S., 2011. *Optimising Power Management Strategies for Railway Traction Systems*, Birmingham: s.n.
- MAO, B., JIA, W., CHEN, S. & LIU, J., 2007. A computer-aided multi-train simulator for rail traffic. *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, pp. 1 –5, 13-15.
- MARTIN, P., 1999. Train performance and simulation. *Simulation Conference Proceedings*, Volume 2, p. 1287 –1294.
- MELLITT, B., MOUNEIMNE, Z. S. & GOODMAN, C. J., 1984. Simulation study of DC transit systems with inverting substations. *IEE Proceedings B, Electric Power Applications*, p. 38–50.
- METRÔ, 2011. *Relatório de sustentabilidade*, s.l.: s.n.
- METRÔ, 2012. *Relatório da Administrativo 2012*, s.l.: s.n.
- MIRANDA, M. M. D., 2012. *Fator de emissão de gases de efeito estufa da geração de energia elétrica no Brasil: implicações da Avaliação do Ciclo de Vida*. São Carlos: USP.
- MOHAN, N., UNDELAND, T. M. & ROBBINS, W. P., 2005. *Power Electronics: Converters*,. 2º ed. New York: s.n.
- MORAES, C. C. D. & CASTRUCCI, P., 2006. *Engenharia de automação industrial*. 2 ed. s.l.:LTC.
- MTA, 2011. *Greening Mass Transit & Metro Regions*, s.l.: s.n.
- MTA, 2012. *2012 Sustainability Report*, s.l.: s.n.
- Nasri A., F. M. M. M. H., 2010. Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion – SPEEDAM 2010*.

NASRI, A., FEKRI MOGHADAM, M. & MOKHTARI, H., 2010. Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion – SPEEDAM 2010, Pisa, Italy*.

NOTHCOTE-GREEN, J. & WILSON, R., 2006. *Control and automation of electrical systems*. s.l.:Taylor & Francis.

PEÑA-ALCARAZ, M., FERNANDEZ, A., CUCALA, A. P. & RAMOS, 2011. Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, pp. 397-408.

PIRES, C. L., 2006. *Simulação do sistema de tração elétrica metro-ferroviária*. São Paulo: USP.

REIN JUNIOR, O., 2006. *Um modelo de integração entre os padrões IEC 61850 e IEC 61970 (CIM/XML)*, São Paulo: s.n.

ROCHARD, B. P. & SCHMID, F., 2004. Benefits of lower-mass trains for high speed rail operations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, Volume 157, p. 51–64.

ROTEM, H., 2008. *Specification of Traction Motor*, Corea: s.n.

SANTOS, A. F. D., 2007. *GERENCIAMENTO DA CONFIABILIDADE EM PROJETOS DE MATERIAL RODANTE FERROVIÁRIO*. São Paulo: USP.

SANTOS, M. A. M. D., 2013. A importância dos tempos de parada na regulação de sistemas de metrô e sua influência na capacidade de transporte – o caso do Metrô de São Paulo. *19º Congresso Brasileiro de transporte e trânsito*, 8 a 10 outubro.

SCHMIDT, P., 1988. *Energieversorgung elektrischer Bahnen*. 1º ed. Berlin: Transpress.

TESSIER, M., 1978. *Traction électrique et thermo-électrique*. Paris: Éditions Scientifiques Riber.

THONG, M. & CHEONG, A., 2012. Energy Efficiency in Singapore's Rapid Transit System. Maio.pp. 38-47.

TOLEDO, E. D. D., POLLONI, E. G. F., MARTINS, W. W. & COLOMBINI MARTINS, R. W., 1987. *Tração elétrica*. 1º ed. São Paulo: Nobel.

UNDERGROUND, L., 2011. *London Underground Environment Strategy 2008-2013*, s.l.: s.n.

UNITED NATIONS, 2015. *World Urbanization Prospects - The 2014 Revision*, New York: s.n.

VASCONCELOS, V. M. A., 2005. *Estudo de limitações de carga em subestações retificadoras de sistema de transporte de passageiros utilizando tração elétrica*, São Paulo: s.n.

VAZQUEZ, S., LUKIC, S. M., GALVAN, E. & FRANQUELO, L. G., 2010. Energy storage systems for transport and grid applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, p. 3881–3895.

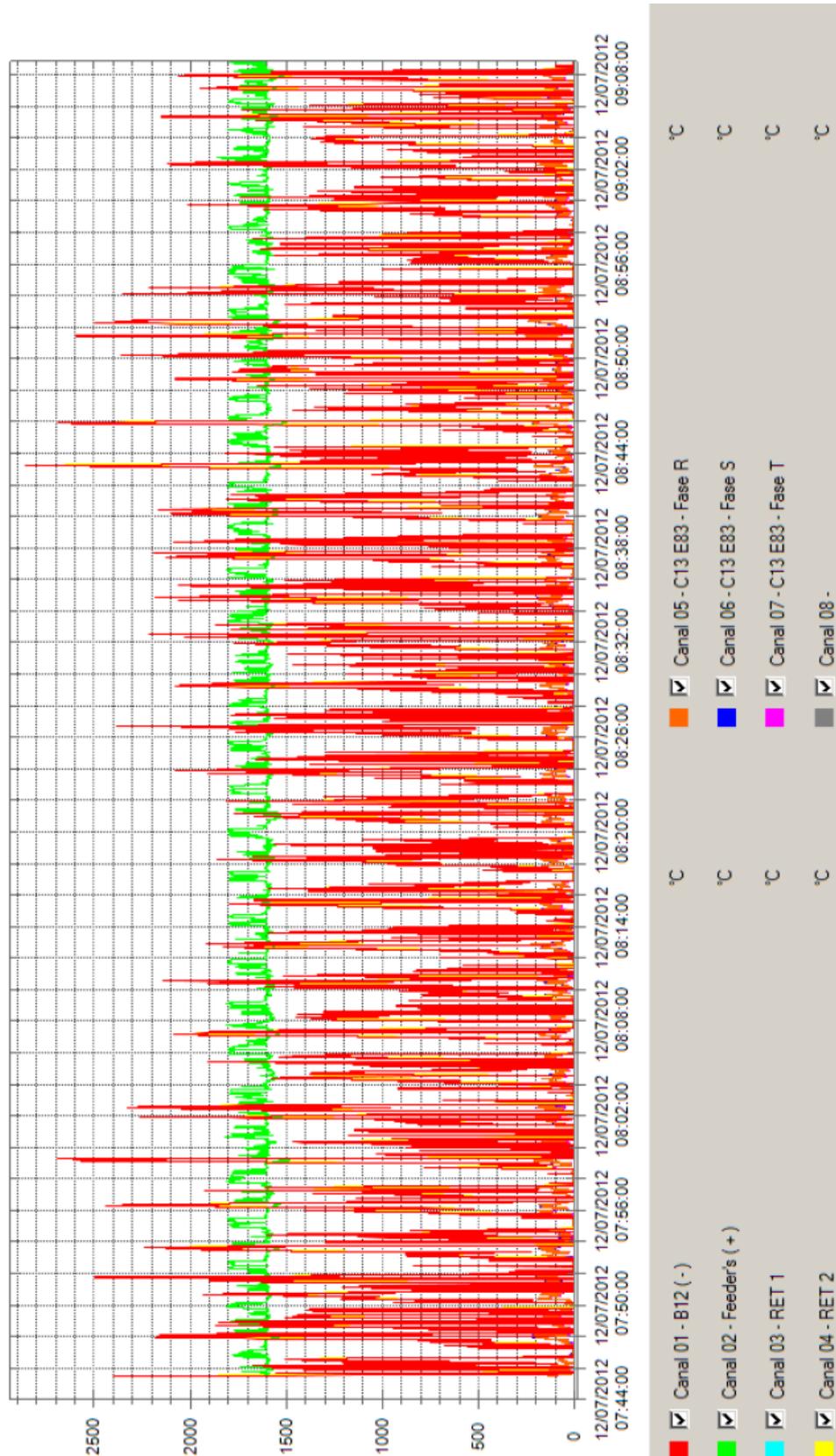
WONG, K. K. & HO, T. K., 2004. Coast control for mass rapid transit railways with searching methods. *IEE Proceedings -Electric Power Applications*, Volume 151, p. 365–376.

YU, D. et al., 2004. Analysis of dynamic mrts traction power supply system based on dependent train movement simulation. *Proceedings of the ASME/IEEE Joint Rail Conference*, 6 agosto, p. 153–161.

ZHANG, W. H., CHEN, J. Z., WU, X. J. & JIN, X. S., 2002. *Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig*. s.l.:Wear.

ANEXO A – MEDIÇÕES DO SISTEMA ELETRICO DA LINHA 4

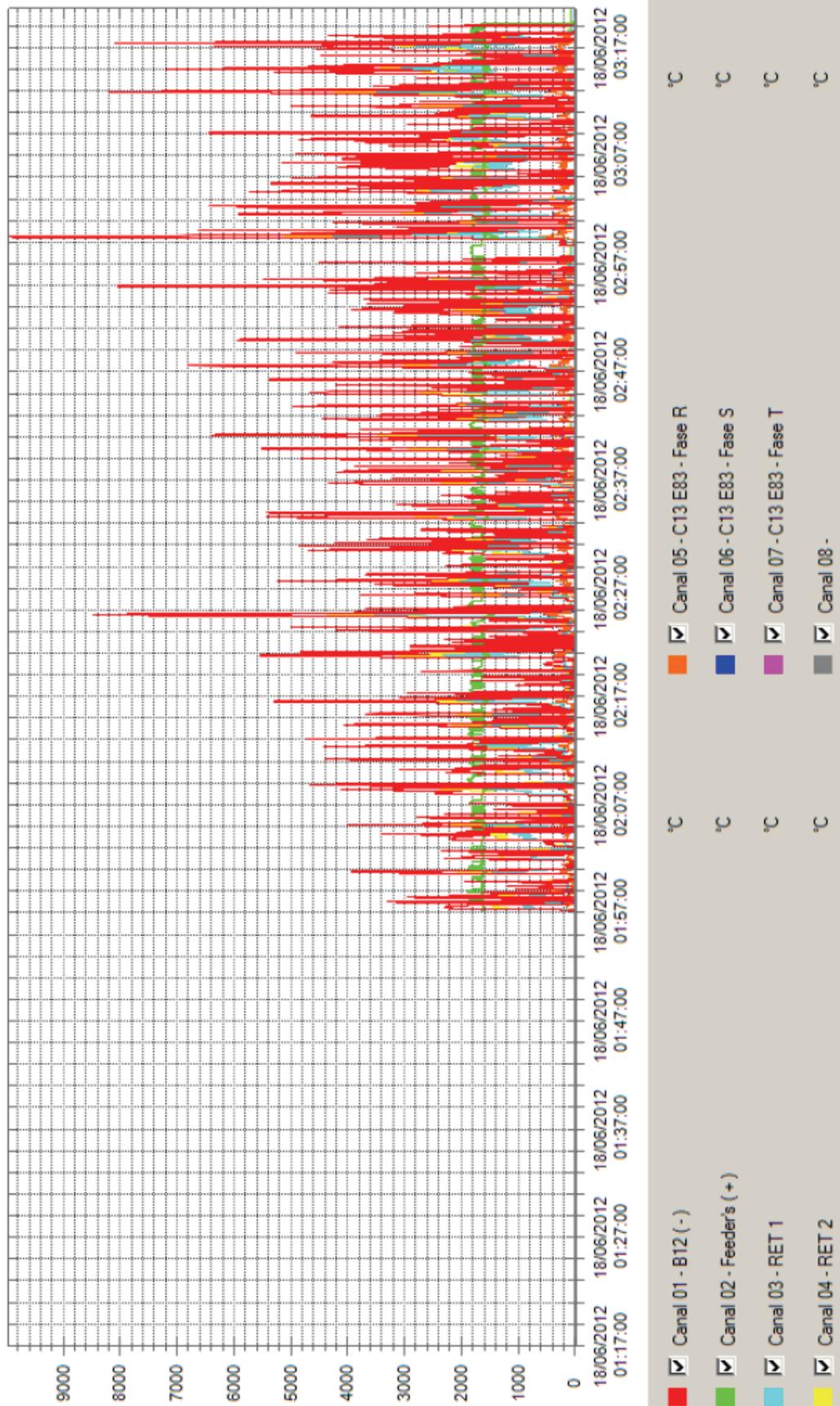
ANEXO A1– MEDIÇÕES NAS SUBESTAÇÕES RETIFICADORAS



Nº Linha	Data/Hora	01	02	03	04	05	06	07	08
1	12/07/12 06:30:23	0	1622	0	161	23	22	15	
2	12/07/12 06:30:23	0	1622	0	83	23	22	15	
3	12/07/12 06:30:23	0	1622	0	83	15	22	15	
4	12/07/12 06:30:23	0	1622	0	83	15	16	15	
5	12/07/12 06:30:23	0	1622	0	83	15	16	10	
6	12/07/12 06:30:23	0	1622	0	83	15	16	10	
7	12/07/12 06:30:23	0	1609	0	83	15	16	10	
8	12/07/12 06:30:23	0	1609	0	83	15	16	10	
9	12/07/12 06:30:23	0	1609	0	37	15	16	10	
10	12/07/12 06:30:24	0	1609	0	37	14	16	10	
11	12/07/12 06:30:24	0	1609	0	37	14	14	10	
12	12/07/12 06:30:24	0	1609	0	37	14	14	8	
13	12/07/12 06:30:24	0	1609	0	37	14	14	8	
14	12/07/12 06:30:24	0	1611	0	37	14	14	8	
15	12/07/12 06:30:24	0	1611	0	37	14	14	8	
16	12/07/12 06:30:24	0	1611	0	4	14	14	8	
17	12/07/12 06:30:24	0	1611	0	4	14	14	8	
18	12/07/12 06:30:24	0	1611	0	4	14	14	8	
19	12/07/12 06:30:24	0	1611	0	4	14	14	9	
20	12/07/12 06:30:25	0	1611	0	4	14	14	9	
21	12/07/12 06:30:25	0	1614	0	4	14	14	9	
22	12/07/12 06:30:25	0	1614	0	4	14	14	9	
23	12/07/12 06:30:25	0	1614	0	0	14	14	9	
24	12/07/12 06:30:25	0	1614	0	0	13	14	9	
25	12/07/12 06:30:25	0	1614	0	0	13	13	9	
26	12/07/12 06:30:25	0	1614	0	0	13	13	7	
27	12/07/12 06:30:25	0	1614	0	0	13	13	7	
28	12/07/12 06:30:25	0	1607	0	0	13	13	7	
29	12/07/12 06:30:25	0	1607	0	0	13	13	7	
30	12/07/12 06:30:26	0	1607	0	0	13	13	7	
31	12/07/12 06:30:26	0	1607	0	0	13	13	7	
32	12/07/12 06:30:26	0	1607	0	0	13	14	7	
33	12/07/12 06:30:26	0	1607	0	0	13	14	10	
34	12/07/12 06:30:26	93	1607	0	0	13	14	10	
35	12/07/12 06:30:26	93	1588	0	0	13	14	10	
36	12/07/12 06:30:26	93	1588	0	0	13	14	10	
37	12/07/12 06:30:26	93	1588	0	0	13	14	10	
38	12/07/12 06:30:26	93	1588	0	0	22	14	10	
39	12/07/12 06:30:26	93	1588	0	0	22	22	10	
40	12/07/12 06:30:27	93	1588	0	0	22	22	17	
41	12/07/12 06:30:27	280	1588	0	0	22	22	17	
42	12/07/12 06:30:27	280	1583	0	0	22	22	17	
43	12/07/12 06:30:27	280	1583	0	0	22	22	17	
44	12/07/12 06:30:27	280	1583	0	10	22	22	17	
45	12/07/12 06:30:27	280	1583	0	10	30	22	17	
46	12/07/12 06:30:27	280	1583	0	10	30	31	17	
47	12/07/12 06:30:27	280	1583	0	10	30	31	23	
48	12/07/12 06:30:27	186	1583	0	10	30	31	23	
49	12/07/12 06:30:27	186	1586	0	10	30	31	23	
50	12/07/12 06:30:28	186	1586	0	10	30	31	23	
51	12/07/12 06:30:28	186	1586	0	35	30	31	23	

Nº Linha	Data/Hora	01	02	03	04	05	06	07	08
52	12/07/12 06:30:28	186	1586	0	35	27	31	23	
53	12/07/12 06:30:28	186	1586	0	35	27	26	23	
54	12/07/12 06:30:28	186	1586	0	35	27	26	18	
55	12/07/12 06:30:28	0	1621	0	35	27	26	18	
56	12/07/12 06:30:28	0	1621	0	35	27	26	18	
57	12/07/12 06:30:28	0	1621	0	35	27	26	18	
58	12/07/12 06:30:28	0	1621	0	19	27	26	18	
59	12/07/12 06:30:28	0	1621	0	19	16	26	18	
60	12/07/12 06:30:29	0	1621	0	19	16	15	18	
61	12/07/12 06:30:29	0	1621	0	19	16	15	9	
62	12/07/12 06:30:29	0	1621	0	19	16	15	9	
63	12/07/12 06:30:29	0	1621	0	19	16	15	9	
64	12/07/12 06:30:29	0	1625	0	19	16	15	9	
65	12/07/12 06:30:29	0	1625	0	19	16	15	9	
66	12/07/12 06:30:29	0	1625	0	0	16	15	9	
67	12/07/12 06:30:29	0	1625	0	0	10	15	9	
68	12/07/12 06:30:29	0	1625	0	0	10	10	9	
69	12/07/12 06:30:29	0	1625	0	0	10	10	5	
70	12/07/12 06:30:30	0	1625	0	0	10	10	5	
71	12/07/12 06:30:30	0	1625	0	0	10	10	5	
72	12/07/12 06:30:30	0	1632	0	0	10	10	5	
73	12/07/12 06:30:30	0	1632	0	0	10	10	5	
74	12/07/12 06:30:30	0	1632	0	0	10	10	5	
75	12/07/12 06:30:30	0	1632	0	0	8	10	5	
76	12/07/12 06:30:30	0	1632	0	0	8	8	5	
77	12/07/12 06:30:30	0	1632	0	0	8	8	3	
78	12/07/12 06:30:30	0	1632	0	0	8	8	3	
79	12/07/12 06:30:30	0	1788	0	0	8	8	3	
80	12/07/12 06:30:31	0	1788	0	0	8	8	3	
81	12/07/12 06:30:31	0	1788	0	0	8	8	3	
82	12/07/12 06:30:31	0	1788	0	0	7	8	3	
83	12/07/12 06:30:31	0	1788	0	0	7	7	3	
84	12/07/12 06:30:31	0	1788	0	0	7	7	3	
85	12/07/12 06:30:31	0	1788	0	0	7	7	3	
86	12/07/12 06:30:31	0	1793	0	0	7	7	3	
87	12/07/12 06:30:31	0	1793	0	0	7	7	3	
88	12/07/12 06:30:31	0	1793	0	0	7	7	3	
89	12/07/12 06:30:31	0	1793	0	0	6	7	3	
90	12/07/12 06:30:32	0	1793	0	0	6	7	3	
91	12/07/12 06:30:32	0	1793	0	0	6	7	2	
92	12/07/12 06:30:32	0	1793	0	0	6	7	2	
93	12/07/12 06:30:32	0	1778	0	0	6	7	2	
94	12/07/12 06:30:32	0	1778	0	0	6	7	2	
95	12/07/12 06:30:32	0	1778	0	0	6	7	2	
96	12/07/12 06:30:32	0	1778	0	0	6	7	2	
97	12/07/12 06:30:32	0	1778	0	0	6	6	2	
98	12/07/12 06:30:32	0	1778	0	0	6	6	2	
99	12/07/12 06:30:32	0	1778	0	0	6	6	2	
100	12/07/12 06:30:33	0	1779	0	0	6	6	2	
101	12/07/12 06:30:33	0	1779	0	0	6	6	2	
102	12/07/12 06:30:33	0	1779	0	0	6	6	2	

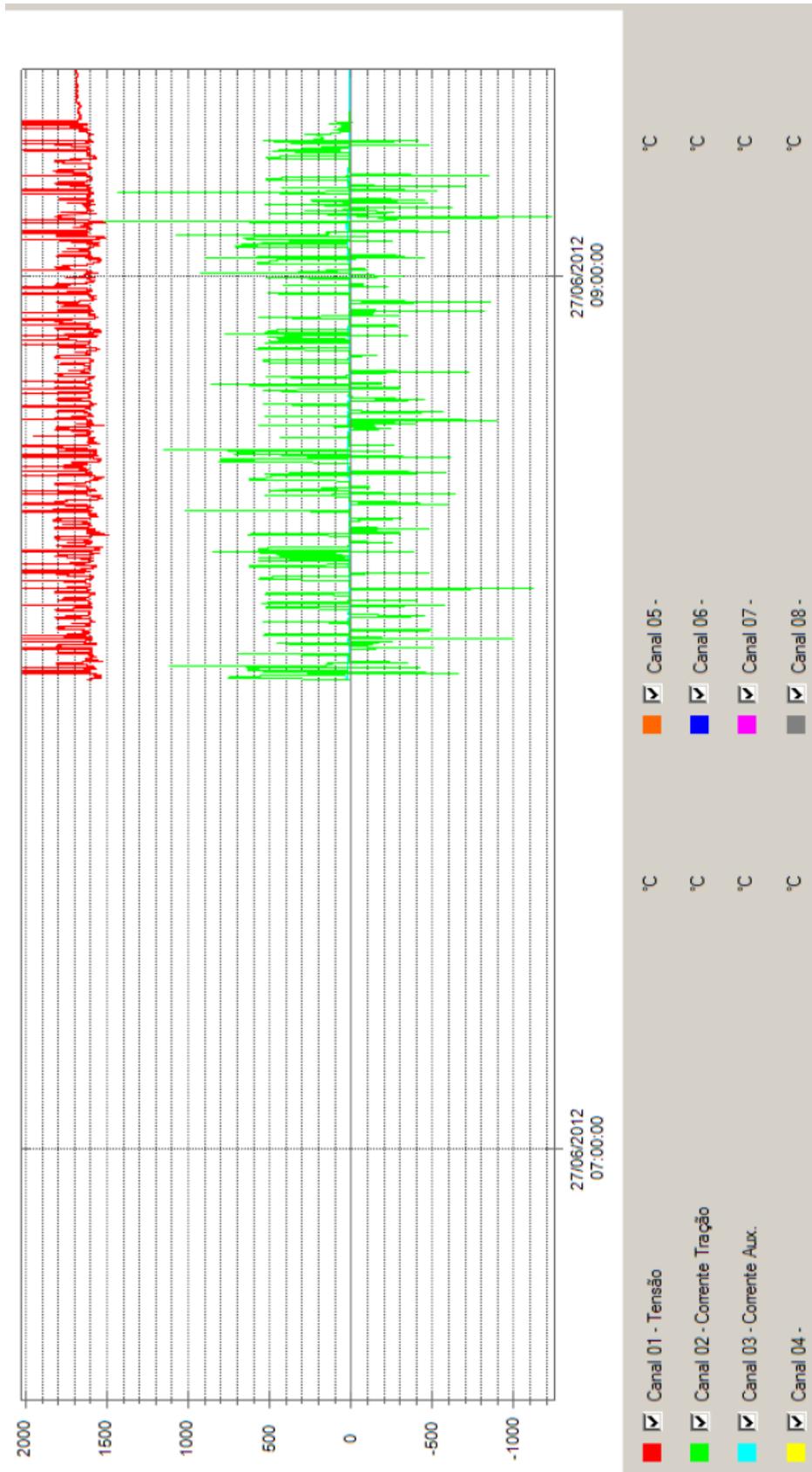
ANEXO A2- MEDIÇÕES NA SUBESTAÇÃO RETIFICADORA DE REPUBLICA



Nº Linha	Data/Hora	01	02	03	04	05	06	07	08
1	18/06/12 01:16:54	41	1615	63	91	1	1	1	
2	18/06/12 01:16:54	41	1615	63	91	1	1	1	
3	18/06/12 01:16:54	41	1615	63	91	1	1	1	
4	18/06/12 01:16:54	41	1615	63	91	1	1	1	
5	18/06/12 01:16:54	35	1615	63	91	1	1	1	
6	18/06/12 01:16:54	35	1618	63	91	1	1	1	
7	18/06/12 01:16:54	35	1618	63	91	1	1	1	
8	18/06/12 01:16:54	35	1618	63	91	1	1	1	
9	18/06/12 01:16:54	35	1618	63	91	1	1	1	
10	18/06/12 01:16:54	35	1618	63	91	1	1	1	
11	18/06/12 01:16:55	35	1618	63	91	1	1	1	
12	18/06/12 01:16:55	34	1618	63	91	1	1	1	
13	18/06/12 01:16:55	34	1617	63	91	1	1	1	
14	18/06/12 01:16:55	34	1617	63	91	1	1	1	
15	18/06/12 01:16:55	34	1617	63	91	1	1	1	
16	18/06/12 01:16:55	34	1617	63	91	1	1	1	
17	18/06/12 01:16:55	34	1617	63	91	1	1	1	
18	18/06/12 01:16:55	34	1617	63	91	1	1	1	
19	18/06/12 01:16:55	36	1617	63	91	1	1	1	
20	18/06/12 01:16:55	36	1616	63	91	1	1	1	
21	18/06/12 01:16:56	36	1616	63	91	1	1	1	
22	18/06/12 01:16:56	36	1616	63	91	1	1	1	
23	18/06/12 01:16:56	36	1616	63	91	1	1	1	
24	18/06/12 01:16:56	36	1616	63	91	1	1	1	
25	18/06/12 01:16:56	36	1616	63	91	1	1	1	
26	18/06/12 01:16:56	36	1616	63	91	1	1	1	
27	18/06/12 01:16:56	35	1616	63	91	1	1	1	
28	18/06/12 01:16:56	35	1617	63	91	1	1	1	
29	18/06/12 01:16:56	35	1617	63	91	1	1	1	
30	18/06/12 01:16:56	35	1617	63	91	1	1	1	
31	18/06/12 01:16:57	35	1617	63	91	1	1	1	
32	18/06/12 01:16:57	35	1617	63	91	1	1	1	
33	18/06/12 01:16:57	35	1617	63	91	1	1	1	
34	18/06/12 01:16:57	35	1617	63	91	1	1	1	
35	18/06/12 01:16:57	41	1619	63	91	1	1	1	
36	18/06/12 01:16:57	41	1619	63	91	1	1	1	
37	18/06/12 01:16:57	41	1619	63	91	1	1	1	
38	18/06/12 01:16:57	41	1619	63	91	1	1	1	
39	18/06/12 01:16:57	41	1619	63	91	1	1	1	
40	18/06/12 01:16:57	41	1619	63	91	1	1	1	
41	18/06/12 01:16:58	41	1619	63	91	1	1	1	
42	18/06/12 01:16:58	33	1619	63	91	1	1	1	
43	18/06/12 01:16:58	33	1617	63	91	1	1	1	
44	18/06/12 01:16:58	33	1617	64	91	1	1	1	
45	18/06/12 01:16:58	33	1617	64	91	1	1	1	
46	18/06/12 01:16:58	33	1617	64	91	1	1	1	
47	18/06/12 01:16:58	33	1617	64	91	1	1	1	
48	18/06/12 01:16:58	33	1617	64	91	1	1	1	
49	18/06/12 01:16:58	34	1617	64	91	1	1	1	
50	18/06/12 01:16:58	34	1618	64	91	1	1	1	
51	18/06/12 01:16:59	34	1618	64	91	1	1	1	

Nº Linha	Data/Hora	01	02	03	04	05	06	07	08
52	18/06/12 01:16:59	34	1618	64	91	1	1	1	
53	18/06/12 01:16:59	34	1618	64	91	1	1	1	
54	18/06/12 01:16:59	34	1618	64	91	1	1	1	
55	18/06/12 01:16:59	34	1618	64	91	1	1	1	
56	18/06/12 01:16:59	38	1618	64	91	1	1	1	
57	18/06/12 01:16:59	38	1617	64	91	1	1	1	
58	18/06/12 01:16:59	38	1617	64	91	1	1	1	
59	18/06/12 01:16:59	38	1617	64	91	1	1	1	
60	18/06/12 01:16:59	38	1617	64	91	1	1	1	
61	18/06/12 01:17:00	38	1617	64	91	1	1	1	
62	18/06/12 01:17:00	38	1617	64	91	1	1	1	
63	18/06/12 01:17:00	42	1617	64	91	1	1	1	
64	18/06/12 01:17:00	42	1615	64	91	1	1	1	
65	18/06/12 01:17:00	42	1615	64	91	1	1	1	
66	18/06/12 01:17:00	42	1615	64	91	1	1	1	
67	18/06/12 01:17:00	42	1615	64	91	1	1	1	
68	18/06/12 01:17:00	42	1615	64	91	1	1	1	
69	18/06/12 01:17:00	42	1615	64	91	1	1	1	
70	18/06/12 01:17:00	37	1615	64	91	1	1	1	
71	18/06/12 01:17:01	37	1619	64	91	1	1	1	
72	18/06/12 01:17:01	37	1619	63	91	1	1	1	
73	18/06/12 01:17:01	37	1619	63	91	1	1	1	
74	18/06/12 01:17:01	37	1619	63	91	1	1	1	
75	18/06/12 01:17:01	37	1619	63	91	1	1	1	
76	18/06/12 01:17:01	37	1619	63	91	1	1	1	
77	18/06/12 01:17:01	36	1619	63	91	1	1	1	
78	18/06/12 01:17:01	36	1619	63	91	1	1	1	
79	18/06/12 01:17:01	36	1619	64	91	1	1	1	
80	18/06/12 01:17:01	36	1619	64	91	1	1	1	
81	18/06/12 01:17:02	36	1619	64	91	1	1	1	
82	18/06/12 01:17:02	36	1619	64	91	1	1	1	
83	18/06/12 01:17:02	36	1619	64	91	1	1	1	
84	18/06/12 01:17:02	41	1619	64	91	1	1	1	
85	18/06/12 01:17:02	41	1618	64	91	1	1	1	
86	18/06/12 01:17:02	41	1618	63	91	1	1	1	
87	18/06/12 01:17:02	41	1618	63	91	1	1	1	
88	18/06/12 01:17:02	41	1618	63	91	1	1	1	
89	18/06/12 01:17:02	41	1618	63	91	1	1	1	
90	18/06/12 01:17:02	41	1618	63	91	1	1	1	
91	18/06/12 01:17:03	35	1618	63	91	1	1	1	
92	18/06/12 01:17:03	35	1616	63	91	1	1	1	
93	18/06/12 01:17:03	35	1616	63	91	1	1	1	
94	18/06/12 01:17:03	35	1616	63	91	1	1	1	
95	18/06/12 01:17:03	35	1616	63	91	2	1	1	
96	18/06/12 01:17:03	35	1616	63	91	2	1	1	
97	18/06/12 01:17:03	35	1616	63	91	2	1	1	
98	18/06/12 01:17:03	35	1616	63	91	2	1	1	
99	18/06/12 01:17:03	39	1616	63	91	2	1	1	
100	18/06/12 01:17:03	39	1617	63	91	2	1	1	
101	18/06/12 01:17:04	39	1617	64	91	2	1	1	
102	18/06/12 01:17:04	39	1617	64	91	2	1	1	

ANEXO A3- MEDIÇÕES NO TREM 4105



Nº Linha	Data/Hora	01	02	03	04	05	06	07	08
1	27/06/12 06:25:30	1678	3	3					
2	27/06/12 06:25:30	1678	3	3					
3	27/06/12 06:25:30	1678	3	3					
4	27/06/12 06:25:30	1678	3	3					
5	27/06/12 06:25:30	1678	2	3					
6	27/06/12 06:25:30	1678	2	3					
7	27/06/12 06:25:30	1678	2	3					
8	27/06/12 06:25:30	1678	2	3					
9	27/06/12 06:25:30	1678	2	3					
10	27/06/12 06:25:30	1678	2	3					
11	27/06/12 06:25:31	1678	2	3					
12	27/06/12 06:25:31	1678	2	3					
13	27/06/12 06:25:31	1678	2	3					
14	27/06/12 06:25:31	1678	2	3					
15	27/06/12 06:25:31	1678	2	3					
16	27/06/12 06:25:31	1678	3	3					
17	27/06/12 06:25:31	1678	3	3					
18	27/06/12 06:25:31	1678	2	3					
19	27/06/12 06:25:31	1678	2	3					
20	27/06/12 06:25:31	1678	2	3					
21	27/06/12 06:25:32	1678	2	3					
22	27/06/12 06:25:32	1678	2	3					
23	27/06/12 06:25:32	1678	2	3					
24	27/06/12 06:25:32	1678	2	3					
25	27/06/12 06:25:32	1678	2	3					
26	27/06/12 06:25:32	1678	2	3					
27	27/06/12 06:25:32	1678	2	3					
28	27/06/12 06:25:32	1678	2	3					
29	27/06/12 06:25:32	1678	2	3					
30	27/06/12 06:25:32	1678	2	3					
31	27/06/12 06:25:33	1678	2	3					
32	27/06/12 06:25:33	1678	2	3					
33	27/06/12 06:25:33	1678	2	3					
34	27/06/12 06:25:33	1678	2	3					
35	27/06/12 06:25:33	1678	2	3					
36	27/06/12 06:25:33	1678	2	3					
37	27/06/12 06:25:33	1678	2	3					
38	27/06/12 06:25:33	1678	2	3					
39	27/06/12 06:25:33	1678	2	3					
40	27/06/12 06:25:33	1678	2	3					
41	27/06/12 06:25:34	1678	2	3					
42	27/06/12 06:25:34	1678	2	3					
43	27/06/12 06:25:34	1678	2	3					
44	27/06/12 06:25:34	1678	2	3					
45	27/06/12 06:25:34	1678	2	3					
46	27/06/12 06:25:34	1678	2	3					
47	27/06/12 06:25:34	1678	2	3					
48	27/06/12 06:25:34	1678	2	3					
49	27/06/12 06:25:34	1678	2	3					
50	27/06/12 06:25:34	1678	2	3					
51	27/06/12 06:25:35	1678	2	3					

Nº Linha	Data/Hora	01	02	03	04	05	06	07	08
52	27/06/12 06:25:35	1678	2	3					
53	27/06/12 06:25:35	1678	2	3					
54	27/06/12 06:25:35	1678	2	3					
55	27/06/12 06:25:35	1678	2	3					
56	27/06/12 06:25:35	1678	2	3					
57	27/06/12 06:25:35	1678	2	3					
58	27/06/12 06:25:35	1678	2	2					
59	27/06/12 06:25:35	1678	2	2					
60	27/06/12 06:25:35	1678	3	2					
61	27/06/12 06:25:36	1678	3	2					
62	27/06/12 06:25:36	1678	3	2					
63	27/06/12 06:25:36	1678	3	2					
64	27/06/12 06:25:36	1677	3	2					
65	27/06/12 06:25:36	1677	3	2					
66	27/06/12 06:25:36	1677	3	2					
67	27/06/12 06:25:36	1677	3	2					
68	27/06/12 06:25:36	1677	3	2					
69	27/06/12 06:25:36	1677	3	2					
70	27/06/12 06:25:36	1677	3	2					
71	27/06/12 06:25:37	1677	3	2					
72	27/06/12 06:25:37	1676	3	2					
73	27/06/12 06:25:37	1676	3	3					
74	27/06/12 06:25:37	1676	3	3					
75	27/06/12 06:25:37	1676	3	3					
76	27/06/12 06:25:37	1676	2	3					
77	27/06/12 06:25:37	1676	2	3					
78	27/06/12 06:25:37	1676	2	3					
79	27/06/12 06:25:37	1676	2	3					
80	27/06/12 06:25:37	1676	2	3					
81	27/06/12 06:25:38	1676	2	3					
82	27/06/12 06:25:38	1676	2	3					
83	27/06/12 06:25:38	1675	2	3					
84	27/06/12 06:25:38	1675	2	3					
85	27/06/12 06:25:38	1675	3	3					
86	27/06/12 06:25:38	1675	3	3					
87	27/06/12 06:25:38	1675	3	3					
88	27/06/12 06:25:38	1675	3	3					
89	27/06/12 06:25:38	1675	3	3					
90	27/06/12 06:25:38	1675	3	3					
91	27/06/12 06:25:39	1675	3	3					
92	27/06/12 06:25:39	1674	3	3					
93	27/06/12 06:25:39	1674	3	3					
94	27/06/12 06:25:39	1674	3	3					
95	27/06/12 06:25:39	1674	3	3					
96	27/06/12 06:25:39	1674	3	3					
97	27/06/12 06:25:39	1674	3	3					
98	27/06/12 06:25:39	1674	3	3					
99	27/06/12 06:25:39	1674	3	3					
100	27/06/12 06:25:39	1673	3	3					
101	27/06/12 06:25:40	1673	3	3					
102	27/06/12 06:25:40	1673	3	3					