UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

RAPHAEL MOTA VALENTIM

Análise de edital e apresentação gráfica dos cálculos cinemáticos e elétricos via software da simulação de marcha de composição ferroviária

São Paulo
2016

RAPHAEL MOTA VALENTIM

Análise de edital e apresentação gráfica dos cálculos cinemáticos e elétricos via software da simulação de marcha de composição ferroviária

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

São Paulo
2016

RAPHAEL MOTA VALENTIM

Análise de edital e apresentação gráfica dos cálculos cinemáticos e elétricos via software da simulação de marcha de composição ferroviária

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de Concentração:
Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu

São Paulo
2016

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: _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Valentim, Raphael Mota

Análise de edital e apresentação gráfica dos cálculos cinemáticos e elétricos via software da simulação de marcha de composição ferroviária /

R. M. Valentim – versão corr.-- São Paulo, 2016.

90p.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Engenharia 2. Tração elétrica 3.Edital I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Ivan Eduardo Chabu, que acreditou em meu potencial e assumiu este projeto comigo.

Agradeço à minha mãe Francisca Alves Mota por ter me ensinado a superar as dificuldades da vida. Minha esposa Marialice Caruzo Pissi Valentim pelo apoio, dedicação e compreensão. Ao meu pai Francisco Valentim de Assis, minha irmã Fernanda Mota Valentim e meu tio Francisco Marcondes Duarte pelo apoio e incentivo.

Agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente, me deram Força e Motivação durante todo o período deste projeto.

Aos verdadeiros amigos que tiveram paciência e atenção comigo, me ajudando a superar os problemas encontrados.

Alem destes, tenho Agradecimentos especiais para:

Pierre Decottignies

Luiz Antonio Juns

Fabio Danilo de Souza

Prof. Dr. Silvio Ikuyo Nabeta

Prof. Alberto Akio Shiga

Prof. Norberto Augusto Júnior

Augusta Caruzo Pissi

Departamento: Equipe de Tração Alstom

RESUMO

Com o crescimento da população, os países, estados e cidades identificam a necessidade de realizar investimentos em infraestrutura, transporte e outros. A proposta do presente trabalho é apresentar uma ferramenta, utilizada para atender a demanda de um edital de licitação, expondo à Companhia de Trens Metropolitanos de São Paulo, um exemplo da parte de um edital internacional para aquisição de um meio de transporte rápido e eficiente. Para tal finalidade, são analisadas e filtradas as informações contidas no edital para realizar a simulação de marcha de uma composição ferroviária, através de um software específico. Por fim, na forma gráfica ilustram-se os cálculos cinemáticos e elétricos do comportamento que o sistema de potência irá desempenhar, mostrando que atende aos requisitos do edital de licitação.

Palavras-Chave: Simulação de marcha. Composição ferroviária. Cálculos cinemáticos e elétricos. Sistema de potência. Edital.

ABSTRACT

With growing of population, countries, states and cities have identified the necessity to perform investments in infrastructure, transportation, among others. The purpose of this dissertation is to present a tool, used to meet the request of a bidding document, presenting to Metropolitan Train Company of São Paulo one example of part of an international bidding to an acquisition of a rapid and efficient transportation. For this purpose, information of bidding document are analysed and filtered to make a running simulation of a train composition through a specific software. Finally, one application of this method is presented in a graphical form containing kinematic and electrical calculations of the behavior that power system will perform, showing that system meets the requirements of bidding document.

Keywords: Running simulation. Train composition. Kinematic and electrical calculations. Power system. Bidding document.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração de um sistema de potência com 1 inversor e 4 motores.....	6
Figura 2 – Ilustração de um sistema de potência com 2 inversores e 4 motores	7
Figura 3 – Ilustração de um motor trifásico de indução (MTI)	9
Figura 4 – Ilustração de três ondas senoidais (modulante) e uma triangular em função do tempo	12
Figura 5 – Configuração do esquema de potência para o projeto.....	29
Figura 6 – Configuração da alimentação elétrica	30
Figura 7 – Exemplo de configuração do indutor de linha na alimentação elétrica	31
Figura 8 – Configuração do recortador reostático	32
Figura 9 – Exemplo de configuração da quantidade de recortador reostático no sistema de potência	32
Figura 10 – Configuração do motor de indução	33
Figura 11 – Composição do módulo de potência (inversor de frequência)	33
Figura 12 – Configuração do percurso, peso e detalhes do trem.....	34
Figura 13 – Página padrão para o resultado da simulação de marcha	34

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Percurso	15
Gráfico 2 – Gráficos do desempenho - Velocidade x Tempo e Esforço x Tempo	16
Gráfico 3 – Gráfico velocidade x tempo	36
Gráfico 4 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Tração	37
Gráfico 5 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Freagem.....	37
Gráfico 6 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Freagem (Elétrica + Mecânica)	38
Gráfico 7 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Tração	39
Gráfico 8 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Freagem.....	39
Gráfico 9 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Freagem (Elétrica + Mecânica)	40
Gráfico 10 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Tração com um carro motor fora de serviço (Carregamento 8 p/m ²).....	41
Gráfico 11 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Freagem (Elétrica + Mecânica) com um carro motor fora de serviço (Carregamento 8 p/m ²).....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela resumo das informações contidas no edital.....	24
Tabela 2 – Configuração dos pesos dos carros em kg	26
Tabela 3 – Detalhamentos para a simulação de marcha	27
Tabela 4 – Resumo dos resultados para os cálculos de cinemática e elétrica (1 percurso ida e volta)	43
Tabela 5 – Resumo dos resultados para os cálculos de cinemática e elétrica (1 dia de operação).....	44
Tabela 6 – metragem x gradiente (rampa)	51
Tabela 7 – metragem x curva (raio)	56
Tabela 8 – metragem x localização da estação	58
Tabela 9 – metragem x restrição de velocidade.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATC:	Automatic Train Control
CBTU:	Companhia Brasileira de Trens Urbanos
CPTM:	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
CVS:	Converter Voltage System
GMV:	Grupo Motor Ventilador
GTO:	Gate Turn-Off Thyristor
IFB:	Invitation for Bids
IBGE:	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGBT:	Insulated Gate Bipolar Transistor
PWM:	Pulse-Width Modulation
MTI:	Motor Trifásico de Indução
SEADE:	Sistema Estadual de Análise de Dados
SNCF:	Société Nationale des Chemins de fer Français
STM:	Secretaria dos Transportes Metropolitanos
TUE:	Trem Unidade Elétrico
UNRIC:	Centro Regional de Informação das Nações Unidas

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

Ψ :	fluxo
C.A. / A.C.:	Corrente Alternada
C.C. / D.C.:	Corrente Contínua
c.v.:	cavalo vapor
choppers:	recortadores
f.e.m.:	força eletromotriz
hs:	horas
km/h:	quilometro por hora
p/m ² :	passageiros por metro quadrado
U:	Tensão
U _d :	Tensão nominal
V _{cc} :	Tensão em corrente contínua

Unidades não representadas nas listas acima constam no Sistema Internacional de Unidades (SI).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	4
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
	4.1 Edital.....	5
	4.2 Configurações do sistema de potência	6
	4.2.1 Motor de corrente alternada e o sistema de tração	8
	4.2.2 Inversor de frequência e o sistema de tração	10
	4.3 Simulação de marcha.....	14
5	METODOLOGIA	18
	5.1 Análise do Edital.....	19
	5.2 Software de simulação de marcha	26
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
7	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS.....	47
	ANEXO A - DADOS RESUMIDOS DO PERCURSO.....	51
	APÊNDICE A – COMPOSIÇÃO DO EDITAL	61
	APÊNDICE B - DESCRIÇÃO TÉCNICA BÁSICA DA INSTALAÇÃO DOS	
	COMPONENTES DO SISTEMA DE TRAÇÃO	62
	APÊNDICE C – MOTOR DE CORRENTE ALTERNADA E O INVERSOR DE	
	FREQUÊNCIA.....	65
	APÊNDICE D – RESUMO DA EVOLUÇÃO DO SISTEMA METROFERROVIÁRIO	
	EM SÃO PAULO.....	68

1 INTRODUÇÃO

Para a aquisição de novos trens, as empresas metroferroviárias abrem um processo para aquisição, o qual é composto por um Edital (item 5.1). No Edital há todas as especificações necessárias para atendimento do objeto que serão solicitadas pelas empresas metroferroviárias, as quais deverão ser apresentadas e detalhadas de forma a atender as suas exigências na proposta do fabricante concorrente a licitação.

As empresas interessadas no fornecimento dos novos trens iniciam assim, um trabalho por diversos setores (jurídico, econômico, sistemas elétricos, sistemas mecânicos e outros). Para a análise da parte elétrica, na qual compõe a simulação de marcha, hoje as empresas utilizam-se de software para realizar os cálculos da proposta a ser fornecida.

Pires (2006) e o Portal ANPT trilhos afirma que ao todo no Brasil existem 15 sistemas metroferroviários de transporte urbano, muitos em tração elétrica. Nestes sistemas, há vários projetos de expansão e/ou modernização da malha em uso atualmente em andamento.

O Plano Integrado de Transportes Urbanos para 2020 (PITU 2020), em São Paulo, prevê a melhoria da acessibilidade e o aumento da mobilidade aos usuários do transporte coletivo. Para isto, a Secretaria de Transportes Metropolitanos (STM) atuou no sentido de consolidar uma rede sobre trilhos que viesse atender, já em 2010, os objetivos principais do PITU e as metas previstas para 2020. Estabeleceram-se então intervenções prioritárias para compor uma rede estrutural com o metrô e a ferrovia atuando de forma complementar.

Dentro destes objetivos ficou evidente a recuperação e a adequação da malha da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) e, simultaneamente, a ampliação da malha da Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô). A efetivação destes investimentos implica em recursos equivalentes a US\$ 600 milhões/ano.

Os projetos metroferroviários seguem as seguintes diretrizes: aumentar as integrações entre os modais, dar continuidade às obras já iniciadas e melhorar a eficiência do que já está em operação, expandir a rede e inovar, buscando novas soluções tecnológicas. O resumo da evolução do sistema metroferroviário em São Paulo pode ser visto no apêndice D.

Com o crescimento da população mundial estimado em mais 2 bilhões de habitantes até o ano 2020, sendo destes aproximadamente 212 milhões no Brasil, 46 milhões no Estado de São Paulo e 12 milhões na cidade de São Paulo. As necessidades em novas infraestruturas de transporte vão aumentar significativamente.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo orientar a identificação e a análise de um edital de licitação, apresentar os componentes que compõem a cadeia de tração, realizar cálculos cinemáticos, definindo a característica e o desempenho do sistema de tração, apresentar a solução para essas condições e demonstrar de maneira gráfica a confiabilidade dos cálculos do sistema para a simulação de marcha, realizados via software.

3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para a realização dos objetivos acima, serão necessários: documento de cliente(s) / edital(is), informações técnicas da licitação, software capaz de realizar o cálculo da simulação de marcha e conhecimento para apresentar os resultados obtidos através dos cálculos realizados pelo software de forma a atender a especificação do edital.

Primeiramente, na fundamentação teórica será apresentada uma abordagem rápida referente ao edital, mostrando possíveis configurações do sistema de potência que possam conter no edital. Uma vez que grande parte do sistema de potência é representada pelo motor de corrente alternada (C.A.) e pelo módulo de potência (inversor), serão apresentados conceitos que agreguem entendimento ao funcionamento destes sistemas, bem como a simulação de marcha.

Posteriormente, na metodologia é apresentada a análise, a aplicação das informações de um determinado edital e o software de tração, então nos resultados e discussão, de forma gráfica, as curvas características do modo de tração e frenagem, que atendam aos requisitos do edital em questão, concluindo-se por fim, a apresentação do trabalho.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Edital

Diante de tamanha evolução no campo tecnológico, empresarial e social, o modelo praticado pela Administração Pública, ficou ultrapassado e nada eficiente, pois nesse modelo as legislações estaduais e municipais regulavam diferentemente seus próprios mecanismos de contratação pública, onde muitas vezes não ficava claro o pretendido e o ofertado, como por exemplo, a Administração Pública à época aplicava calotes aos seus fornecedores e prestadores de serviços.

Com o crescimento da população, o mundo a cada dia mais dinâmico, a crescente demanda por bens, obras e serviços, tornou-se imprescindível a adoção de procedimentos e mecanismos de controle, que garantam a aplicação do grande volume de recursos disponíveis, com eficiência e transparência. Surge então, a necessidade de um modelo gerencial na gestão administrativa, capaz de realizar a função pública de forma eficiente, moderna, acompanhando a evolução econômica e financeira da sociedade, onde uma das formas eficazes utilizadas pela Administração Pública é a licitação.

Criaram-se bases conforme a Constituição de 1988, nas quais mais tarde, em 21 de junho de 1993, assentou-se a Lei Federal nº 8.666, que instituiu o Estatuto das Licitações e Contratos Administrativos, onde desde a abertura do processo administrativo da licitação impõem-se a indicação dos recursos apropriados.

A elaboração do edital é atividade de elevada importância, pois é nele que serão estipuladas as regras: desde critérios de habilitação e classificação, a preço, pagamento, sanções, demais regras procedimentais, e minuta do contrato administrativo que será firmado com o vencedor.

Conforme Dallari (1992), a definição de edital, em sentido amplo, é o instrumento pelo qual se faz pública pela imprensa ou em lugares apropriados das repartições, certas notícias, fato ou ordenança, às pessoas nele referidas e outras que possam ter interesse a respeito do assunto que nele contém. Já em sentido estrito, Meirelles (1990) afirma que o edital é um instrumento pelo qual a administração leva ao conhecimento público sua intenção de realizar uma licitação e fixa as condições de realização dessa licitação.

Pode-se definir o edital como a forma de ser colocada em papel a necessidade de um grupo ou comunidade como uma ferramenta para realizar uma determinada aquisição.

No edital, é obrigatório definir as condições para o atendimento das necessidades ao cumprimento do seu objeto. Em uma licitação pública de aquisição de transporte ferroviário, o edital é composto por diversos segmentos, os quais podem ser vistos de forma resumida no apêndice A, onde um destes segmentos solicita um estudo detalhado para um determinado sistema de potência, conforme será mostrado no item 4.2.

4.2 Configurações do sistema de potência

Os sistemas de potências podem ter diversas configurações, de acordo com as instalações físicas existentes ou disponíveis para serem estudadas e implantadas. A seguir se têm dois modelos mais comuns utilizados de possíveis configurações para o sistema de potência (Figura 1 e Figura 2) aplicados em alguns projetos, como por exemplo, o metrô e os trens de São Paulo.

Figura 1 – Ilustração de um sistema de potência com 1 inversor e 4 motores

Legenda:

Alimentação elétrica em corrente contínua - Vcc

Pantógrafo – P1 e P2

Motores de tração – MT-1, 2, 3 e 4

Conversor de tensão auxiliar – CVS1 e 2

Fonte: Autor.

Algumas considerações devem ser feitas sobre a Figura 1, pois dependendo da potência do inversor de frequência, é possível modificar o sistema de potência (Figura 1), colocando dois inversores em paralelo, sendo que cada inversor irá controlar dois motores (Figura 2).

Figura 2 – Ilustração de um sistema de potência com 2 inversores e 4 motores

Legenda:

Alimentação elétrica em corrente contínua - Vcc

Motores de tração – MT-1, 2, 3 e 4

Fonte: Autor.

Comparando-se as Figuras 1 e 2, verifica-se que na Figura 1 caso se apresentar um problema no inversor de frequência, todo um carro da composição terá os motores inoperantes, podendo implicar em redução no desempenho do sistema de tração. Já na Figura 2, caso ocorra esse problema, somente 2 motores não funcionarão, ou seja, há um melhor rendimento no desempenho do conjunto do trem ao utilizar-se 1 inversor de frequência para controlar 2 motores.

Optando-se pela aplicação da Figura 2, há uma desvantagem no quesito inversor de frequência, pois o custo é dobrado, onde cada carro da composição terá 2 inversores de frequência contra 1 unidade utilizada na Figura 1.

A quantidade de inversores a serem utilizados por carro faz parte do edital e é especificado pelo cliente.

Nesse ponto, o software de tração é bastante flexível, pois é possível simular uma composição “um trem completo” com alguns motores isolados, possibilitando as seguintes verificações: se uma composição é capaz de rebocar a outra e ver como o sistema se comporta em tais condições. Também é possível modificar algumas características, caso o sistema esteja trabalhando no limite de operação ou fora das especificações do projeto.

Considerando que nos dois exemplos citados anteriormente possuem equipamentos iguais (indutor de linha, resistor de frenagem, inversor e motores de tração), onde os que possuem um pouco mais de complexidade são os motores de tração e o inversor, serão apresentados a seguir algumas vantagens e funcionamento destes sistemas. O apêndice B mostra uma descrição técnica básica desses equipamentos.

4.2.1 Motor de corrente alternada e o sistema de tração

O surgimento do motor assíncrono como motor de tração, significou um marco importante na evolução tecnológica dos veículos de tração elétrica. A ideia de usar motores de indução em trens apareceu pela primeira vez na virada do século (1900) (WOJTAS, 1990). Entretanto, apesar da grande simplicidade do motor assíncrono de tração, houve necessidade de alimentá-lo através de conversores estáticos complexos de comutação forçada. Portanto, ele apresentou, praticamente, a transferência da complexidade do motor de tração de corrente contínua para o conversor estático (MARTINS, 1986).

Os motores de corrente alternada, especialmente os motores de indução (Figura 3), possuem a vantagem de serem construtivamente muito mais simples e robustos do que os motores de corrente contínua e trouxe a possibilidade da construção de locomotivas universais que são igualmente ajustadas para rebocar trens de passageiros e cargas pesadas sem mudança da relação de transmissão (AUGUSTO JÚNIOR, 2008).

Figura 3 – Ilustração de um motor trifásico de indução (MTI)

Fonte: Portal national instruments, 2015.

Ainda comparando-se as vantagens do motor de indução em relação aos motores de corrente contínua, verifica-se que seu tamanho chega a ser de 20 a 40% menor do que o motor c.c. e sendo mais leve, pode ser posicionado no espaço confinado do truque, tendendo a causar menos danos à via e desempenhar uma mesma potência do que motores c.c. maiores, ou seja, mais potência para o mesmo volume ou menos peso para a mesma potência. O motor menor implica também em menor custo de aquisição e manutenção preventiva e corretiva do que os motores c.c. equivalentes. O momento de inércia do motor de indução tipo gaiola também é menor do que nos motores de corrente contínua, e podem resistir a temperaturas mais elevadas. (WOJTAS, 1990); (PIRES, 2002) e (AUGUSTO JÚNIOR, 2008).

Conforme Pires (2006) o motor de indução apresenta desvantagens em relação ao motor de corrente contínua, onde pode-se citar o problema da divisão de cargas entre os motores de um trem, onde um caso típico é aquele no qual os diâmetros das rodas associadas aos motores de tração sejam diferentes. Para uma configuração que, por exemplo, utiliza dois motores de corrente contínua ligados em paralelo, a relação entre os dois conjugados é igual ao inverso do quadrado da relação entre os diâmetros das rodas correspondentes, ou seja, um pouco maior que a unidade.

Outro ponto a ser considerado é no momento da perda da aderência das rodas motoras e a consequente patinagem, onde o esforço de tração diminui,

fazendo com que haja um pequeno acréscimo da velocidade, ou seja, o motor não irá disparar. Isto ocorre quando um motor de indução é alimentado com frequência fixa. Esta excelente característica não se aplica à família de curvas resultantes da variação da tensão e frequência de alimentação, onde se faz necessária a adição de um dispositivo antipatinagem ao comando do motor assíncrono tal qual nos veículos acionados por motores de corrente contínua (COSSIÉ, 1977); (MOSER, 1978); (GUEDES, 1992) e (PIRES, 2002).

Como pode ser observado anteriormente, as vantagens do emprego do motor de indução do tipo gaiola na tração elétrica, vêm sendo citadas e mostradas por diversos autores como (AUGUSTO JÚNIOR, 2008), (LARGIADÈR, 1970), (MARTINS, 1986), (PIRES, 2002 e 2006) e outros.

Na Europa, desde a metade da década de oitenta, o motor de indução tipo gaiola comandado por inversores tem sido empregado de forma ampla na construção de locomotivas e de TUEs (trem unidade eléctrico). No Brasil, apesar do interesse da aplicação desta tecnologia prevaleceram os acionamentos através de motores de corrente contínua e recortadores (choppers) e somente no ano de 2000 a tração elétrica no Brasil entrou em uma nova fase, com a remodelação do sistema e modernização do material rodante das linhas de trens metropolitanos (ALOUICHE, 1992) e (PIRES, 2002).

4.2.2 Inversor de frequência e o sistema de tração

A aplicação dos inversores em motor de indução em tração no início tornaram-se controverso nas ferrovias Europeias por causa de sua complexidade, principalmente porque afetava a confiabilidade do sistema nos equipamentos de estado sólido utilizados nos inversores (WOJTAS, 1990) e (PIRES, 2002).

Novas técnicas de controle, como o inversor com controle vetorial, possibilitaram aos motores C.A. apresentarem comportamento similar ao das máquinas C.C., eliminando, também neste aspecto, o que era uma das vantagens inerentes aos motores C.C. (AUGUSTO JÚNIOR, 2008).

Como desvantagens, apresentaram aumento das perdas nas frequências elevadas de comutação dos transistores de potência e interferências nas redes de alimentação e emissão eletromagnética que podiam interferir nos demais equipamentos sensíveis e instalados próximos aos inversores. As interferências

foram solucionadas com a aplicação de filtros de redes apropriados e blindagem dos cabos da instalação dos inversores (AUGUSTO JÚNIOR, 2008).

Conforme Wojtas (1990), o desenvolvimento no início dos anos oitenta do tiristor tipo GTO de alta potência, combinado com o controle microprocessado, tornou-se o meio para a aplicação dos motores de indução em transporte ferroviário de tração elétrica, abrindo caminho para a realização de circuitos alimentados em corrente contínua em um único estágio por terem a capacidade de desligamento independente da tensão da rede. Inicialmente foram utilizados para o transporte urbano em baixas tensões (750 Vcc, por exemplo), posteriormente para tensões mais elevadas como 3000 Vcc. Este período de desenvolvimento maior dos semicondutores de potência também deu espaço para a aplicação do motor síncrono na tração elétrica (NOUVION, 1984); (ORTHMANN, 1988) e (PIRES, 2002).

A partir da metade da década de noventa, o transistor bipolar, em especial o de "gate" isolado, o IGBT (insulated gate bipolar transistor) começou a substituir os GTOs, na faixa de potências até 200 kW, onde um dos motivos foi devido a sua capacidade de corte da corrente, sendo aplicados nos conversores auxiliares das locomotivas e acionamentos principais em veículos leves. As principais vantagens que ofereciam eram custos menores, pesos menores, maior eficiência e melhor confiabilidade além de possibilitarem uma frequência de modulação mais alta (STEIMEL, 1996); (COLASSE; MASSELUS, 2000) e (PIRES, 2002).

O inversor de frequência, composto por seis interruptores, associados em pares, permitem ajustar a tensão e a frequência do motor e, por consequência, a velocidade e o esforço. É o ajuste do tempo de condução dos interruptores que permite a modulação da tensão de saída do inversor, de 0 V até seu valor máximo com onda plena e é por esta razão que chama-se esse tipo de pilotagem de modulação de largura de pulso e o conversor de inversor PWM. Nestes inversores, a tensão de entrada D.C. é essencialmente constante em magnitude, onde uma ponte retificadora é usada para regular a tensão de linha. Portanto, o inversor deve controlar a magnitude e a frequência das tensões de saída A.C.. A modulação PWM, consiste de um sinal triangular de alta frequência, de pelo menos 10 vezes do sinal que se deseja modular, e outro senoidal na frequência que se deseja a tensão de saída. Quando o sinal triangular encontra o sinal senoidal o controle envia uma ordem de chaveamento alternado de abertura ou fechamento para o IGBT (MOHAN;

UNDELAND; ROBBINS, 1995); (DECOTTIGNIES, 2005); (PIRES, 2006) e (AUGUSTO JÚNIOR, 2008).

Uma tensão será obtida nos terminais do conversor de tal modo que a tensão média confere a cada instante de tempo uma onda aproximadamente senoidal, se uma sequência de chaveamento no circuito do inversor é iniciada. Caso a largura dos pulsos positivos varie em relação aos pulsos negativos, então o valor da tensão senoidal obtida irá variar. Similarmente, se a razão da sequência cíclica dos pulsos é variada a frequência da onda obtida irá variar também. O inversor de frequência gera então um sistema de tensões trifásicas e equilibradas que são reguláveis em amplitude e frequência. (MARUGAN, 1982) e (PIRES, 2006).

Os pulsos são gerados através de técnicas de modulação. Uma entre as diversas técnicas de modulação disponíveis – a natural “sampling PWM” – consiste na comparação de uma onda triangular (portadora) com três ondas senoidais (modulantes) com defasagem de 120° entre elas (Figura 4) e de frequência desejável para a tensão de saída, criando uma onda senoidal da tensão do motor. O ajuste da tensão de saída do inversor é o resultado dessa comparação, pois a forma de onda triangular é uma frequência de comutação, que estabelece a frequência com que os interruptores serão chaveados. Os pontos de comutação dos tiristores são determinados pela intersecção da onda portadora com a onda modulante. A relação entre o valor de pico da onda modulante e o valor de pico da onda portadora é chamada taxa de modulação. A tensão de saída do inversor pode então ser variada através da taxa de modulação (BOSE, 1981); (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 1995); (DECOTTIGNIES, 2005) e (PIRES, 2006).

Figura 4 – Ilustração de três ondas senoidais (modulante) e uma triangular em função do tempo

Fonte: (DECOTTIGNIES, 2005)

Da partida do trem até a velocidade máxima, a onda triangular muda em função das características do inversor, principalmente sua frequência de comutação. A lei de pilotagem consiste em definir a frequência e a tensão adequadas do inversor em função da velocidade (DECOTTIGNIES, 2005).

De acordo com Decottignies (2005), os tipos de modulação são:

Modulação assíncrona:

Utilizada na partida do motor, pois a frequência da onda triangular é constante e não ultrapassa a frequência máxima do inversor.

Modulação síncrona:

A frequência da onda triangular é múltipla da frequência do estator e não ultrapassa a frequência máxima do inversor.

Modulação síncrona com ângulos calculados:

Este tipo de pilotagem utiliza ângulos predeterminados de condução dos IGBTs, com diferentes possibilidades de ajustes, permitindo a transição para onda plena sem grandes variações do conjugado motor.

Onda plena:

A frequência do inversor é igual à frequência do motor, sendo impossível ajustar o valor da tensão do estator, que depende só do valor da tensão da linha.

O controle dos inversores é feito através de técnicas de controle escalar e controle vetorial, assim as grandezas de comando do inversor são, portanto, a taxa de modulação que regula a amplitude da tensão do estator e a frequência das correntes do estator que regula a fase da tensão U , em relação ao fluxo Ψ , (COURTOIS et al., 1998) e (PIRES, 2006).

4.3 Simulação de marcha

De acordo com Martins (1986), a simulação de marcha é uma poderosa ferramenta de trabalho, fundamental para o sistema de tração elétrica e imprescindível para o dimensionamento do mesmo, tendo como objetivo calcular seu desempenho em um dado percurso e fornecer o comportamento desta carga elétrica móvel ao longo do sistema. Para tanto, deve-se conhecer as características geométricas, físicas e operacionais do veículo, a fim de que se possa calcular em intervalos regulares ao longo da linha, o tempo de percurso do veículo, sua velocidade e aceleração, a potência absorvida, a energia consumida e entre outros parâmetros, conforme exemplos demonstrados nos gráficos (Gráfico 1 e Gráfico 2). Para o cálculo de tais parâmetros, é tomada uma das variáveis da cinemática como independente e através de integrações sucessivas, determinam-se as demais.

Nota:

No exemplo do Gráfico 1, é possível ver a distância total da via (ida e volta = 97422,00 m) e a Altitude (em metros).

Gráfico 2 – Gráficos do desempenho - Velocidade x Tempo e Esforço x Tempo

Fonte: (SOFTWARE)

Conforme Pires (2006), para uma simulação de marcha, deve-se admitir:

- os parâmetros da via (rampas, curvas e eventuais características);
- as velocidades permitidas e desejadas em cada trecho da via;
- os parâmetros do trem (tipo, massa, e peso aderente);
- as características do trem em regime de tração e freagem com dados completos como circuito, corrente do motor e valores limites;
- o esforço produzido pelos freios mecânicos;
- os requisitos particulares como acelerações desejadas e paradas.

Com os dados da via, há a primeira variável de entrada para a simulação, que é o traçado da via de operação. O traçado de via é estritamente fundamental e em alguns casos é feita a simulação na pior via do mapa ferroviário do cliente em questão, pois caso o cliente mude alguns trens para operarem em vias diferentes da licitada em determinados horários de operação, pode-se assegurar o desempenho do sistema de tração.

5 METODOLOGIA

Para concretização do objetivo da dissertação, utilizar-se-á como modelo as informações do edital de licitação pública para fornecimento de novos trens e será realizada a simulação do desempenho do sistema de tração, conhecido como “simulação de marcha”, utilizando um software específico proprietário para este tipo de aplicação, os quais serão apresentados os resultados de forma gráfica do desempenho do sistema de potência. O fluxograma a seguir, específica a dinâmica do trabalho aqui desenvolvido.

5.1 Análise do Edital

Como a licitação possui diversas áreas, entre elas, jurídica, econômica e técnica, por ter assuntos diversos em seu conteúdo, como por exemplo, texto, planilha, desenhos e outros, gera assim uma grande quantidade de páginas, que são disponibilizadas às empresas.

Uma vez que não há uma ferramenta computadorizada dedicada para auxiliar no entendimento, interpretação e separação para as diversas áreas de uma licitação, necessitando ser disponibilizado em sua íntegra para leitura e localização da parte a interessar. Diante de tal fato, a busca por ferramentas que minimizem recurso, erro de análise e tempo torna-se mais frequente.

O trabalho aqui apresentado orientará uma forma de identificação mais rápida para o desenvolvimento da simulação de marcha, apresentando através de planilha e de forma resumida, pontos de interesse a serem identificados no edital.

Para exemplificar, utilizou-se de informações do Edital de Concorrência Pública Internacional, IFB Nº - STM 001/2009, para fornecimento de 9 trens, com 8 carros cada, para a Companhia de Trens Metropolitanos de São Paulo – CPTM, de acordo com o Portal Banco Mundial.

Normalmente em editais dessa finalidade, além da quantidade de páginas citadas anteriormente, há uma grande quantidade de anexos, o qual a parte de identificação dos componentes aplicados no sistema de potência e requisitos para a simulação de marcha encontra-se no anexo I – Especificação Técnica, que será apresentada de forma resumida conforme a seguir:

Item 1 – Condições gerais e requisitos

Item 1.1 - Inclinação máxima

A inclinação máxima é de 4%, em +/- 500 metros de comprimento.

Item 1.2 - Raio mínimo de curva horizontal

O raio mínimo em que a composição ferroviária terá de ocupar é de 80 m.

Na via principal, o raio mínimo é de 180 m.

Existem seções onde a concordância é feita considerando a simultaneidade de curvas reversas onde o comprimento mínimo da reta entre as curvas é de 25m.

Item 1.3 - Raio mínimo de concordâncias verticais

Para a via principal: 750 m.

Item 1.4 - Trilho e superelevação

Trilho: padrão A.R.E.M.A.

Superelevação máxima: 160 mm.

Item 1.5 - Condições ambientais

Os trens devem circular em condições normais ao ar livre e em túneis com quaisquer condições meteorológicas existentes na região onde as vias estão localizadas.

Para efeitos de cálculo e definir as características dos equipamentos, considerar os ambientes com variação de temperatura entre 0 °C a 40 °C e umidade relativa máxima de 95%, devem ser considerados uma poluição ambiental alta e chuva ácida.

No caso de um carro totalmente fechado parado sob o sol, com todos os equipamentos de ar condicionado desligados, a temperatura interna pode atingir 80 ° C.

Item 2 – Requisitos gerais

Item 2.1 - Capacidade de transporte

A capacidade nominal deve ser, pelo menos, 2600 passageiros para um conjunto de trem e carregamento de 8 passageiros em pé por m². Deve haver uma oferta mínima de 22% de lugares sentados respeitando a capacidade nominal do conjunto de trem.

Item 2.2 - Características dimensionais

Configuração do conjunto do trem – CMC+CR+CR+CM+CM+CR+CR+CMC

Onde:

CMC: carro motor com cabine

CR: carro reboque

CM: carro motor

Item 3 – Requisito de desempenho

Item 3.1 - Requisitos para circulação

O trem operacional deve ser rebocado por outro conjunto de trem idêntico ou por outro conjunto de trem da CPTM, classe 2000, na linha principal com os passageiros.

Os trens devem ser capazes de circular normalmente, em quaisquer condições de carga, com o desgaste máximo das rodas, a flexão máxima da suspensão e deslocamentos laterais máximos possíveis.

Nas vias auxiliares, os trens vão circular em velocidade reduzida em curvas com um raio mínimo de 80 m, sem ser necessário desmontar nenhum equipamento.

Nas vias principais, os trens irão circular normalmente, vazios ou carregados, em curvas com raio mínimo de 180 m.

A velocidade máxima operacional deve ser de 90 km/h.

O trem deve ser capaz de operar automaticamente em baixa velocidade (25 km/h) por tempo indeterminado, sem quaisquer restrições. Em qualquer velocidade menor que 25 km/h, o trem deve ser capaz de operar continuamente durante, pelo menos, uma hora.

Item 3.2 - Desempenho de tração

O trem, em qualquer condição de carga, até 8 passageiros/m², em tangente e em rampa, deve ter um valor máximo de aceleração inicial de 0,9 m/s², e permitir uma aceleração média de 0,9 m/s² de 0 a 50 km/h (6 passageiros/m²).

A variação da aceleração por unidade de tempo ("solavanco") não deve exceder 1,0 m/s³.

A empresa responsável pelos projetos do trem deverá apresentar a curva em relação aos esforços de tração em função da velocidade e da aceleração em função da velocidade.

Item 3.3 - Desempenho de frenagem

A verificação do desempenho do sistema de frenagem deve ser feito de acordo com a norma EN-13452.

A variação de desaceleração por unidade de tempo ("solavanco") não deve exceder 1,0 m/s³.

Nota: As mudanças entre os vários tipos de frenagem não devem perturbar os passageiros.

a) Frenagem de serviço

Devem ser previstos os seguintes tipos de frenagem de serviço:

- por atrito;
- elétrico regenerativo;
- elétrico reostático;
- combinação de regenerativo e reostático;
- combinação de elétrico e por atrito.

A frenagem de serviço deve permitir uma desaceleração máxima de $1,1 \text{ m/s}^2$ (+ 7% - 0%), independentemente da velocidade do trem com carga até 8 passageiros/m².

A frenagem elétrica deve ser concebida como a principal forma de parar o trem e deve fornecer frenagem elétrica entre 90 e 5 km/h e carros com qualquer condição de carga, desde vazio até 8 passageiros/m². Entre 70 e 10 km/h, a frenagem de serviço elétrico deve operar garantindo uma desaceleração até $0,7 \text{ m/s}^2$ (+ 7% - 0%). Para a desaceleração entre $0,7$ e $1,1 \text{ m/s}^2$ e dependendo da condição de carga, o freio elétrico pode ser suplementado pelo freio de atrito.

A frenagem elétrica deve ser totalmente regenerativa. Se a tensão de linha não estiver receptiva, a frenagem deve ser combinada em regenerativa e reostática.

A fim de garantir uma desaceleração de $1,1 \text{ m/s}^2$ no caso de falha do freio elétrico de um carro, deve ser considerado o "blending" da frenagem elétrica de outro carro em conjunto com o freio de atrito do carro onde o freio elétrico falhou.

No caso de falha ou mau funcionamento do freio elétrico, uma taxa de desaceleração de $1,1 \text{ m/s}^2$ (+ 7% -0%) deve ser assegurada apenas com o freio de atrito.

b) Frenagem de emergência

A frenagem de emergência deve ser feita apenas por atrito e assegurar uma taxa de desaceleração de $1,2 \text{ m/s}^2$ (+ 7% -0%) para qualquer velocidade, com uma carga de até 8 passageiros/m².

O freio de emergência pode ser aplicado, pelo menos das seguintes formas:

- Pelo controlador (punho ou botão de emergência);
- Por atuação do dispositivo de homem morto;
- Pela atuação dos dispositivos de emergência localizados no interior dos compartimentos dos carros de passageiros desde que o trem não esteja a uma distância superior a 180 m da plataforma;
- Pelo comando CBTC;
- Pelo detector de descarrilamento;
- Pela baixa pressão de ar no sistema de frenagem.

Após a aplicação da frenagem de emergência pelo controlador ou pela ação do dispositivo de homem morto, deve ser irreversível e deve evitar o restabelecimento da tração por um período de tempo a ser configurado pela CPTM de 0 a 15 segundos após a total parada do trem.

Quando a frenagem de emergência é aplicada pelo sistema CBTC, o restabelecimento da tração pelo sistema de sinalização pode ser feita imediatamente após a total parada do trem, se as condições de circulação estiverem normalizadas.

Se a aplicação de emergência ocorrer por ato dos dispositivos de emergência localizados nos compartimentos dos carros de passageiros, as condições normais de tração devem ser novamente reestabelecida por um dispositivo instalado na cabine do trem.

Item 4 – Requisitos para a operação

Item 4.1 - Regime de serviço

Os trens, em quaisquer condições de carga e até 8 passageiros/m², serão operados continuamente por pelo menos 20 horas por dia, em velocidade máxima de 90 km/h.

O tempo de parada nominal nas estações será de cerca de 30s, mas é possível ter paradas mais longas ou curtas, variando entre 10 e 60 s.

Uma vez identificados os pontos de interesse dos requisitos apresentados para a simulação de marcha, pode-se elaborar um filtro para preenchimento, transferindo as informações de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Tabela resumo das informações contidas no edital

Item	Descrição	Quantidade/Valor	Requisitos/Definições
1	Resistor de Frenagem	1 Conjunto	1 conjunto por carro motor
2	Motor de tração	16	4 motores por carro
3	Inversor de frequência	1	1 inversor por carro motor
4	Condições gerais e requisitos		
4.1	Inclinação máxima	4%	em +/- 500 metros de comprimento
4.2	Raio mínimo de curva horizontal		
4.2.1	Ocupação da composição ferroviária	80 m	
4.2.2	Via principal	180 m	
4.2.3	Simultaneidade de curvas reversas	25 m	comprimento mínimo da reta entre as curvas
4.3	Raio mínimo de concordâncias verticais		
4.3.1	Via principal	750 m	
4.4	Trilho e superelevação		
4.4.1	Trilho	padrão A.R.E.M.A.	
4.4.2	Superelevação máxima	160 mm	
4.5	Condições ambientais		
4.5.1	Tipo de clima	Tropical	
4.5.2	Variação de temperatura	0 a 40° C	
4.5.3	Umidade média máxima	95%	
4.5.4	Altitude máxima	1000 m	
4.5.5	Poluição Ambiental	Alta e chuva ácida	
5	Requisitos gerais		
5.1	Capacidade de transporte	2600 passageiros	para um conjunto de trem e densidade de 8 passageiros em pé por m ² deve haver uma oferta mínima de 22% de lugares sentados respeitando a capacidade nominal do conjunto de trem
5.2	Características dimensionais		
5.2.1	Configuração do trem	8 Carros	CMC+CR+CR+CM+CM+CR+CR+CMC
6	Requisito de desempenho		
6.1	Requisitos para circulação		
6.1.1	Velocidade máxima	90 km/h	
6.2	Desempenho de tração		
6.2.1	Aceleração máxima inicial	0.90 m/s ²	

Item	Descrição	Quantidade/Valor	Requisitos/Definições
6.2.2	Aceleração média (0-50 km/h - 6 p/m ² - AW1)	0.90 m/s ²	
6.2.3	Taxa de solavanco	1.0 m/s ³	
6.3	Desempenho de frenagem		
6.3.1	Desaceleração serviço máxima	1.10 m/s ²	independentemente da velocidade do trem com carga até 8 passageiros/m ²
6.3.2	Frenagem principal (elétrica)	entre 90 e 5 km/h	vazio até 8 passageiros/m ²
6.3.3	Desaceleração serviço (entre 70 e 10 km/h)	até 0,7 m/s ²	
6.3.4	Desaceleração de emergência máxima	1.20 m/s ²	deve ser feita apenas por atrito, com uma carga de até 8 passageiros/m ²
7	Requisitos para a operação		
7.1	Regime de serviço		
7.1.1	Operação	pelo menos 20 horas por dia	em quaisquer condições de carga e até 8 passageiros/m ² em velocidade máxima de 90 km/h
7.1.2	Tempo de parada nominal nas estações	30 s	é possível ter paradas mais longas ou curtas, variando entre 10 e 60 s

Fonte: Autor.

De posse das informações contidas na Tabela 1, pode-se iniciar o estudo para a realização da simulação de marcha via software e obter os dados de análise para atendimento aos requisitos do edital.

5.2 Software de simulação de marcha

A simulação do sistema de tração elétrica visa determinar as características do movimento da composição ferroviária e o comportamento dos subsistemas de alimentação e transmissão, diante ao carregamento do sistema estudado (TOLEDO et al., 1988).

De acordo com Pires (2006), os dados iniciais da simulação são constituídos pela geometria da linha a ser estudada (rampas, curvas, extensão e estações), pelas características da composição ferroviária a ser simulada (como massa/peso, tipo do acionamento, característica do esforço motor em função da velocidade), pelas características operacionais da linha (com tempo médio de parada em cada estação e tempos de manobra nas estações inicial e final).

A partir destes dados é realizada uma simulação de marcha, a fim de se determinar as características elétricas e cinemáticas do movimento das composições ferroviárias (TOLEDO et al., 1988).

O exemplo de aplicação aqui mostrado é a simulação de marcha de uma composição, nesse caso uma proposta a ser fornecida para um trem metropolitano da cidade de São Paulo, cujo trem unidade é acionado através de inversores de frequência e motores de indução do tipo gaiola e a rede de alimentação é em 3000 V corrente contínua. O percurso da simulação é composto por 16 estações.

Utilizando as informações do item 5.1 da Tabela 1 e a informação da equipe que realizará a configuração da composição dos componentes e a distribuição nos carros da composição ferroviária, no trabalho em questão, tem-se o peso, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Configuração dos pesos dos carros em kg

Peso (kg)		CMC (kg)	CM (kg)	CR (kg)	Peso Total em kg com 8 Carros CMC+CR+CR+CM+CM+CR+CR+CMC
AW0	Vazio	45100	44600	39370	336880
AW1	6 passageiros/m ²	61620	62492	57262	477272
AW2	8 passageiros/m ²	65460	67196	61966	513176
AW3	10 passageiros/m ²	70300	71900	66670	551080

Fonte: Autor.

De posse das informações anteriores e contidas na Tabela 2, desenvolve-se a Tabela 3 para detalhar os componentes para a simulação de marcha.

Tabela 3 – Detalhamentos para a simulação de marcha

Item	Descrição	Quantidade/Valor	Requisitos/Definições
1	Configuração do trem	8 Carros	CMC+CR+CR+CM+CM+CR+CR+CMC
2	Massa rotativa	33688 kg	
3	Motor de tração	16	4 motores por carro
4	Inversor de frequência	1	1 inversor por carro motor
5	Condições ambientais		
5.1	Tipo de clima	Tropical	
5.2	Variação de temperatura	0 a 40° C	
5.3	Umidade média máxima	95%	
5.4	Altitude máxima	1000 m	
5.5	Poluição	PD 4 (Norma EN 50124-1)	
6	Detalhes do trem		
6.1	Velocidade máxima		
6.2	Aceleração média (0-50 km/h - 6 p/m ² - AW1)	0.90 m/s ²	
6.3	Desaceleração (serviço)	1.10 m/s ²	
6.4	Desaceleração (emergência)	1.20 m/s ²	
6.5	Taxa de solavanco	1.0 m/s ³	
7	Eficiência de transmissão	97%	
8	Engrenagem	6.2/1	
9	Diâmetro da roda	914 mm	
10	Detalhes do sistema de tração		
10.1	Alimentação da linha	3000 Vcc	
10.2	Tensão nominal em tração	3000 Vcc	
10.3	Tensão nominal em freagem regenerativa	3000 Vcc	
10.4	Tensão nominal em freagem reostática	3600 Vcc	
10.5	Inversor de frequência	de acordo com o fornecedor	
10.6	Motor de tração	de acordo com o fornecedor	
10.7	Resistor de freagem	8.1 Ω	
10.8	Frequência do recortador	300 Hz	
10.9	Indutor de linha	1 unidade de 35 mH 1 unidade de 1,5 mH	
11	Resumo das informações do percurso		
11.1	Comprimento do percurso	101914 m (Ida e volta)	
11.2	Tempo de parada entre estações	20 s	
11.3	Tempo de reversão na última estação	180 s	
11.4	Número de estações	16	
11.5	Rampa máxima	4%	
11.6	Funcionamento da linha	entre as 04:00 e 24:00 hs	

Fonte: Autor.

Com os detalhamentos dos itens 1 a 9 da tabela 3, é possível configurar os componentes que farão parte do sistema de potência (item 10). O dimensionamento

e escolha dos componentes que compõe o sistema de tração são realizados individualmente e verificados em quesito de desempenho para verificar se o mesmo atende a necessidade do cliente (edital).

Observação:

Os valores detalhados do projeto do percurso (item 11) costumam ser feitos manualmente, ou seja, as informações do projeto são digitadas e conferidas por uma pessoa habilitada para a função e também é considerada uma das partes mais importantes para o início da simulação de marcha, pois se houverem erros nas informações do percurso, a simulação de marcha estará comprometida e não representará fielmente o percurso para qual o trem será ofertado, podendo acarretar na escolha de componentes como inversor de frequência e motor de indução errados para a real necessidade do sistema de potência. Os dados resumidos do percurso podem ser vistos no anexo A.

A partir da geometria da via de ida ou da geometria das vias de ida e volta (rampas e curvas), dos diagramas de esforço motor e freante (modelo de diagramas) em função da velocidade e de alguns dados de operação como o tempo de parada nas estações e o tempo de reversão nas pontas da linha, é feita simulação de marcha. Como resultados da simulação de marcha, tem-se a velocidade, aceleração, potência mecânica, espaço percorrido e tempo de percurso da composição durante o seu trajeto.

A simulação de marcha utilizada pelo software leva em consideração o máximo desempenho da composição, sendo este determinado ou pela velocidade máxima da composição, pela restrição civil de velocidade ou pelo envelope de ATC.

Para elaborar a proposta do trem, é realizado um estudo e verificadas as melhores opções dos componentes dos sistemas, mencionado anteriormente nos detalhes do sistema de tração, que serão aplicados de forma a atender o edital de especificação. Os fabricantes muitas vezes possuem os sistemas a serem fornecidos ou possuem parcerias com empresas capazes de atenderem ao especificado. Nos próximos passos serão mostrados os sistemas a serem utilizados para esse projeto e suas configurações, compondo assim o esquema de potência.

A composição do esquema do projeto será a seguinte: alimentação em corrente contínua, recortador reostático, inversor de frequência (chamado de módulo de potência) e motor assíncrono (Figura 5).

Figura 5 – Configuração do esquema de potência para o projeto

Legenda:

Representação da entrada de alimentação elétrica

Representação do filtro RLC, sendo a parte RL

Representação do recortador reostático = "chopper"

Representação do inversor de frequência

Representação dos motores de tração

Fonte: (SOFTWARE)

Para a configuração inicial do sistema de potência, tem-se o seguinte (Figura 6):

- alimentação de entrada: 3000 Vcc;
- quantidade de motores por carro: 4 unidades;
- inversor de frequência por carro: 1 unidade;
- configuração dos indutores de linha: $L1 = 35 \text{ mH}$ e $L3 = 1.5 \text{ mH}$

As informações dos dados de entrada da Figura 6 foram selecionadas da tabela 3, itens 3, 4, 10.1 e 10.9.

Figura 6 – Configuração da alimentação elétrica

Fonte: (SOFTWARE)

A Figura 7 exemplifica como fica o arranjo do indutor de linha no contexto do sistema de potência.

Figura 7 – Exemplo de configuração do indutor de linha na alimentação elétrica

Fonte: (SOFTWARE)

Para a configuração do recortador reostático, tem-se o seguinte (Figura 8):

- escolha do módulo IGBT a ser aplicado;
- tempo de chaveamento em milissegundos (ms): 0,021;
- quantidade de módulo de IGBTs em paralelo: 1;
- frequência de chaveamento (Hz): 300.

As informações dos dados de entrada da Figura 8 foram selecionadas da tabela 3, item 10.8.

Nota:

Normalmente as empresas que confeccionam os IGBTs possuem parceria com empresas que fornecem trens, onde são desenvolvidos projetos (IGBTs) específicos para os módulos de potência, onde o tempo de chaveamento e IGBTs em paralelo é informado pelo tipo de fabricante escolhido e conhecimento do material aplicado. Entre os fabricantes de IGBT nesse segmento, pode-se citar: Mitsubishi e Eupec.

Figura 8 – Configuração do recortador reostático

Fonte: (SOFTWARE)

A Figura 9 exemplifica como fica o arranjo do recortador reostático no sistema de potência.

Figura 9 – Exemplo de configuração da quantidade de recortador reostático no sistema de potência

Fonte: (SOFTWARE)

Para a configuração do motor de indução, tem-se o seguinte (Figura 10):

- escolha do motor a ser aplicado;
- engrenagem: 6.2/1;
- quantidade de motores por inversor: 4 unidades;
- eficiência de transmissão: 97%;
- diâmetro da roda: 914 mm.

As informações dos dados de entrada da Figura 10 foram selecionadas da tabela 3, itens 3, 4, 7, 8 e 9.

Figura 10 – Configuração do motor de indução

Fonte: (SOFTWARE)

O módulo de potência será composto pelos seguintes inversores de frequência: EUPEC (Figura 11).

Figura 11 – Composição do módulo de potência (inversor de frequência)

Fonte: (SOFTWARE)

Para realizar os cálculos cinemáticos (Figura 12) há a necessidade de configurar a temperatura ambiente, aplicar a fórmula utilizada, nesse caso a

escolhida é do tipo DAVIS, inserir o percurso da via, o peso do trem e os detalhes do trem (velocidade, aceleração, desaceleração e taxa de solavanco).

Figura 12 – Configuração do percurso, peso e detalhes do trem

Fonte: (SOFTWARE)

De posse de todas essas informações e configurações realizadas para o sistema de potência, é possível realizar a simulação de marcha do projeto. A Figura 13 ilustra a página padrão que são obtidos os resultados da simulação de marcha.

Figura 13 – Página padrão para o resultado da simulação de marcha

Fonte: (SOFTWARE)

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma vez que há uma enorme quantidade de resultados gerados pela simulação de marcha, existe a necessidade de conhecimento para extrair as informações de interesse e aplicá-las na proposta a ser fornecida ao cliente para atendimento do edital.

Normalmente tem uma equipe técnica que realiza a análise das propostas em relação ao atendimento do edital, onde os gráficos são as formas simplificadas de apresentar o comportamento que o sistema irá desempenhar para submeter ao cliente como resultado de que o sistema de potência atende ao edital de licitação. A apresentação de forma gráfica facilita a análise pela equipe técnica e possibilita o entendimento de outros envolvidos no processo, como por exemplo, a equipe administrativa.

Os gráficos (Gráfico 3 a Gráfico 11) a seguir contêm as curvas características do modo de tração e frenagem:

- esforço de tração (kN);
- aceleração (m/s^2);
- esforço de freagem (kN);
- desaceleração (m/s^2).

Como os trens estão constantemente variando de carga, ou seja, quantidade de passageiro transportado, a simulação elétrica é configurada no software para as diferentes condições da mesma.

Uma vez validadas as condições de tração e frenagem, é aplicado o percurso da via na simulação para uma corrida ida e volta.

O Gráfico 3 mostra o gráfico da velocidade do trem em função do tempo com um carregamento de 8 p/m².

Gráfico 3 – Gráfico velocidade x tempo

Velocidade=f(tempo) Desempenho

Fonte: Autor.

Através de uma análise do Gráfico 3 observa-se que o trem atinge a velocidade de 90 km/h em aproximadamente 42 segundos.

Para o mesmo percurso e carregamento anterior, o Gráfico 4, o Gráfico 5 e o Gráfico 6 mostram o desempenho do esforço e aceleração em função da velocidade em tração e freagem.

Gráfico 4 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Tração

8C AW2 8p/m² - Curva em Tração 3000V

Gráfico 5 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Freagem

8C AW2 8p/m² - Curva em Freagem elétrica 3000V

Gráfico 6 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Freagem (Elétrica + Mecânica)

Fonte: Autor.

Pode-se observar no Gráfico 4, em tração, que o trem manteve seu esforço constante, com 500 kN, e uma aceleração de aproximadamente 0,9 m/s², até a velocidade de 50 km/h em tração.

Para o Gráfico 5, em freagem elétrica, o trem tem um aumento do esforço e desaceleração entre 90 e 70 km/h e depois se mantém com o esforço constante e uma desaceleração de aproximadamente 0,7 m/s² até 10 km/h, e entre 10 km/h e 5 km/h realiza a freagem elétrica.

Já o Gráfico 6, em freagem elétrica e mecânica, verifica-se uma desaceleração constante de 1,1 m/s² entre 90 e 0 km/h. O trem tem um aumento do esforço elétrico e uma diminuição do esforço mecânico entre 90 e 70 km/h e depois se mantém com o esforço elétrico constante e um esforço mecânico de aproximadamente 225 kN até aproximadamente 10 km/h, e entre 10 km/h e 5 km/h realiza a transição entre a freagem elétrica e mecânica, onde a freagem de 5 a 0 km/h é realizada somente através do freio mecânico.

Os gráficos (Gráfico 7 , Gráfico 8 e Gráfico 9) mostram o desempenho do esforço e aceleração em função da velocidade em tração e freagem para o carregamento de 6 p/m².

Gráfico 7 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Tração

Fonte: Autor.

Gráfico 8 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Freagem

Fonte: Autor.

Gráfico 9 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Freagem (Elétrica + Mecânica)

Fonte: Autor.

Pode-se observar que mesmo com a variação da carga de 8 p/m² para 6 p/m², no Gráfico 7, em tração, similar ao Gráfico 4, o trem manteve seu esforço constante, com aproximadamente 500 kN, e uma aceleração de aproximadamente 0,9 m/s², até a velocidade de 50 km/h em tração.

Para o Gráfico 8, em freagem elétrica, similar ao Gráfico 5, o trem tem um aumento do esforço e desaceleração entre 90 e 70 km/h e depois se mantém com o esforço constante e uma desaceleração de aproximadamente 0,7 m/s² até 10 km/h, e entre 10 km/h e 5 km/h realiza a freagem elétrica.

Já o Gráfico 9, em freagem elétrica e mecânica, similar ao Gráfico 6, verifica-se uma desaceleração constante de 1,1 m/s² entre 90 e 0 km/h. O trem tem um aumento do esforço elétrico e uma diminuição do esforço mecânico entre 90 e 70 km/h e depois se mantém com o esforço elétrico constante e um esforço mecânico de aproximadamente 200 kN até aproximadamente 10 km/h, e entre 10 km/h e 5 km/h realiza a transição entre a freagem elétrica e mecânica, onde a freagem de 5 a 0 km/h é realizada somente através do freio mecânico.

As informações apresentadas através dos gráficos 3 a 9, atendem por exemplo, aos requisitos da tabela 1, itens 6.1, 6.2 e 6.3.

A simulação de marcha ainda permite realizar o estudo do comportamento do sistema de potência caso se tenha um carro motor inoperante (Degradado=fora de serviço). Um carro motor pode estar inoperante devido a uma falha no sistema, ou outro problema que mereça uma melhor análise.

O Gráfico 10 e o Gráfico 11 mostram o desempenho do esforço e aceleração em função da velocidade em tração e freagem com 1 carro motor inoperante (fora de serviço) para o carregamento de 8 p/m² (pior caso).

Gráfico 10 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Tração com um carro motor fora de serviço (Carregamento 8 p/m²)

Fonte: Autor.

Gráfico 11 – Gráfico Esforço e Aceleração x Velocidade em Freagem (Elétrica + Mecânica) com um carro motor fora de serviço (Carregamento 8 p/m²)

Fonte: Autor.

Com 1 carro motor fora de serviço, verifica-se uma diminuição do esforço e aceleração até a velocidade de 50 km/h em tração e um aumento do esforço mecânico e uma redução na desaceleração em freagem, conforme gráficos (Gráfico 10 e Gráfico 11).

Uma continuidade da apresentação da proposta ao cliente é através de uma tabela de comparação entre o desempenho do sistema de potência para as diferentes cargas aplicadas, onde a Tabela 4 a seguir resume o cálculo de desempenho para o sistema de tração no modo normal e degradado e apresenta o resumo dos resultados para os cálculos de cinemática e elétrica utilizando os detalhes do trem e os dados operacionais mencionados anteriormente.

Tabela 4 – Resumo dos resultados para os cálculos de cinemática e elétrica (1 percurso ida e volta)

	8p/m ²			6p/m ²	
	Modo Normal	Modo Degradado 1 CM fora de serviço	Modo Normal Velocidade restrita 50 km/h	Modo Normal	Modo Degradado 1 CM fora de serviço
Tempo (s)	6534	6696	8947	6522	6680
Distância (m)	101914	101914	101914	101914	101914
Velocidade Comercial (km/h)	56.15	54.79	41.01	56.25	54.92
Tempo de corrida (s)	5614	5776	8027	5602	5760
Velocidade média (km/h)	65.35	63.52	45.71	65.49	63.70
Tempo total de parada (s)	920.00	920.00	920.00	920.00	920.00
Tempo de parada (s)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
Tempo de reversão (s)	180.00	180.00	180.00	180.00	180.00
Rpm / 90 km/h	3238.82	3238.82	3238.82	3238.82	3238.82
Velocidade de rotação média (rpm)	2351.84	2285.88	1644.85	2356.88	2292.23
Corrente RMS da fase do motor de tração (A)	68.63	74.78	50.25	66.10	72.04
Corrente RMS da fase do motor de tração (A) sem tempo de parada	74.04	80.52	53.05	71.32	77.58

Fonte: Autor.

No estudo realizado na Tabela 4, considerou-se para a análise o comportamento do motor de tração, rpm e corrente RMS, verifica-se que a distância percorrida pela simulação coincide com a distância de projeto. Também é possível verificar que o tempo que o trem demorará então para realizar o percurso, será de 6534 segundos (aproximadamente 2 horas) em modo normal com 8 p/m².

A Tabela 5 resume o cálculo de desempenho para o sistema de tração em um dia de operação, incluindo o horário de pico, com variação de carga de acordo com o tempo. O fator considerado para o tempo de intervalo entre as estações aplicado foi de 5% e de 3% para cada configuração de carga e a carga utilizada foi de 8 p/m² e 150 passageiros por carro. Utiliza-se esta aplicação dos fatores, com base em experiências reais, onde as composições podem ter paradas durante o seu trajeto antes de chegar a uma determinada estação, seja por outra composição parada na estação por falha do sistema, acúmulo de usuários na plataforma e outros fatores, assim como as cargas podem variar, utilizando nesse exemplo o pior caso para um carregamento de 8 p/m², onde devido a uma superlotação a quantidade poderia ser um pouco superior, diferente das configurações pré-estabelecidas.

Tabela 5 – Resumo dos resultados para os cálculos de cinemática e elétrica (1 dia de operação)

	Corrida normal	Aplicando o Fator
Tempo (s)	52086	53980
Distância (m)	815312	815312
Velocidade Comercial (km/h)	56.35	54.37
Tempo de corrida (s)	44726	46620
Velocidade média (km/h)	65.62	62.96
Tempo total de parada (s)	7360	7360
Tempo de parada (s)	20	20
Tempo reversão (s)	180	180
Rpm / 90 km/h	3238.82	3238.82
Velocidade de rotação média (rpm)	2361.62	2265.68
Corrente RMS da fase do motor de tração (A)	64.20	60.90
Corrente RMS da fase do motor de tração (A) sem tempo de parada	69.30	65.60

Fonte: Autor.

No estudo realizado na Tabela 5, considerou-se para a análise o comportamento do motor de tração, rpm e corrente RMS, verifica-se que a distância percorrida pela simulação coincide com 8 vezes a distância de projeto. Também é possível verificar que o tempo que o trem demorará então para realizar o percurso será de 52086 segundos (aproximadamente 14,5 horas) em modo normal com 8 p/m².

As diversas fórmulas de cálculos que são realizadas pelo software podem ser vistas na literatura, como por exemplo, (MARTINS, 1986), (TOLEDO et al., 1988), (PIRES, 2006) e (ALLENBACH et al., 2008).

7 CONCLUSÃO

Pela análise anterior, conclui-se que apesar do desenvolvimento em relação à simulação de marcha já ter sido apresentado em trabalhos anteriores, como em (MARTINS, 1986), (TOLEDO et al., 1988), (PIRES, 2006) e outros autores, o que distingue este desenvolvimento dos demais nas literaturas mais recentes, é a identificação das informações contidas em um edital de concorrência pública, a fim de realizar a simulação de marcha para o fornecimento de uma nova proposta a ser fornecida de um trem que só existe no edital em questão, de forma a complementar as informações geradas por meio da literatura apresentada por diversos autores.

Com a redução do tempo demandado para identificar os pontos para a simulação de marcha, acelera-se a especificação dos componentes para atendimento dos requisitos do edital e consecutivamente para a elaboração da proposta. Uma vez que a licitação compreende demais áreas a serem atendidas, a redução de tempo em qualquer segmento é primordial para uma proposta melhor elaborada.

Outro ponto a ser considerado, é que muitas vezes os recursos destinados a uma licitação possuem um curto tempo para uso, ou seja, os editais podem ter um período de abertura e encerramento rápidos, o qual acaba induzindo as empresas despreparadas a apresentarem propostas não condizentes com a real necessidade, correndo assim o risco de preencher erroneamente a planilha de quantidades sem se atentar ao memorial descritivo ou projeto, quando esses fazem parte do edital, gerando valores maiores (exemplo: superfaturamento de uma obra) ou sendo desclassificadas.

Caso esta empresa venha ser a ganhadora da licitação, após a contratação, poderá não conseguir atender ao edital, produzindo impactos negativos econômicos, sociais e outros, como por exemplo, não conseguir realizar a execução do objeto contratado, aplicar produtos de baixa qualidade e outros, onde mais uma vez, o fato de se ter uma ferramenta ou metodologia que agilize ou auxilie no entendimento do edital se faz necessária.

Deve-se notar também a forma de se realizar a apresentação dos resultados da simulação de marcha ao cliente, sendo que após ser concluído o projeto e tornar-se real (fornecimento do trem), o mesmo utilizará as informações geradas na fase de projeto e resultados obtidos da simulação de marcha para validação da aplicação.

O trabalho em questão, ainda permite que surjam outros futuros em duas outras vertentes, sendo uma opção a comparação dos ensaios realizados do trem fornecido (dados obtidos na via de operação através do comissionamento do trem) e os resultados apresentados durante o processo de licitação (dados obtidos da simulação de marcha) e a outra opção seria a apresentação das demais áreas que realizam seus estudos para o atendimento ao edital de licitação, como por exemplo, sistema de comunicação.

REFERÊNCIAS

- ALLENBACH, J.-M. et al. **Traction électrique**. Lausanne: Presses Universitaires Romandes, 2008. 652p.
- ALOUCHE, P. L. Evolução dos Sistemas de Propulsão metro ferroviários. In: **EMAT. 3**. São Paulo, 1992. **Anais...** São Paulo: [s.n.], 1992. p. 16-35.
- AUGUSTO JÚNIOR, N. USJT – Laboratório Integrado II – **MTI – Funcionamento, Construção e Ligações**, 2007.
- AUGUSTO JÚNIOR, N. USJT – Laboratório Integrado III – **Conversores CA/CA – Inversor de Frequência**, 2008.
- BOSE, B. K. Introduction to AC drives. In: BOSE, B. K. **Adjustable speed AC drive systems**. New York: IEEE Press, 1981. p. 1-21. Section 1.
- BRASIL. Decreto-lei n. 8.666, de 21 de Junho de 1993. Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 jun. 1993.
- COLASSE, A.; MASSELUS, J. –E. Introduction of IGBT technology in railway rolling stock design. **Rail International Schienen der Welt**, ano 31, p. P18-P22, sept. 2000.
- COSSIÉ, A. Essai de transmission asynchrone avec convertisseur statique, a la SNCF. **Revue Générale des Chemins de Fer**, ano 96, p. 517-529, oct. 1977.
- COURTOIS, C. et al. **Traction électrique ferroviaire**. Paris: Techniques de l'ingénieur, 1998. 92p.
- DALLARI, A. A. **Aspectos jurídicos da licitação**. São Paulo: Saraiva, 1992.
- DECOTTIGNIES, P. **O motor assíncrono na tração elétrica**. São Paulo: [s.n.], 2005.
- GUEDES, M. V. O motor de indução trifásico para tração elétrica. **Eletricidade**, ano 36, n. 290, p. 205-208, jun. 1992.
- JUSTEN FILHO, Marçal. **Comentários à Lei de Licitações e Contratos Administrativos**. São Paulo: Dialética, 2008.
- LARGIADÈR, H. Design aspects of induction motors for traction applications with supply through static frequency changers. **Brown Boveri Review**, Baden, v.57, n. 4, p. 152-167, 1970.

MARTINS, Roberto W. C. **Sistema de tração elétrica: análise e dimensionamento**, São Paulo, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1986.

MARUGAN, R. T. Problems and Outlook of three-phase traction in railways. In: ROLLING STOCK WORK GROUP MEETING, Hamburg, 1982. **Anais...** Hamburg: UITP – International Metropolitan Railway Committee, 1982, p. 1-16.

MEIRELLES, H. L. **Licitação e Contrato Administrativo**. São Paulo: Revista dos Tribunais, 1990.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power electronics: converters, applications and design**. New York: John Wiley & Sons, 1995. 802p.

MOSER, R. A comparative study of the various types of electric traction motor in their specific fields of application. **Brown Boveri Review**, Baden, v. 65, n. 12, p. 795-810, 1978.

NAKAMURA, I. O. et al.. **Implementação de energia eólica** na Universidade São Judas Tadeu. São Paulo: Universidade São Judas Tadeu, 2008.

NOUVION, F. F. Three-phase motors in electric rail traction. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-20, n. 5, p. 1152-1170, sept. / oct. 1984.

ORTHMANN, J. -M. O desenvolvimento da tecnologia de tração elétrica por acionamento trifásico. **Revista Siemens**, v. VIII, n. 3, p. 12-18, 1988.

PIRES, C. L., **Simulação de marcha de composição ferroviária acionada por motores de indução e pwm**, São Paulo, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

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

Portal Associação Nacional dos Transportadores de Passageiros sobre Trilhos. Disponível em:

<<http://anptrilhos.org.br/wp-content/uploads/2015/03/BALANCO-2013.pdf>>

Acesso em: 07 de nov. 2016.

<<http://www.mobilize.org.br/midias/pesquisas/balanco-do-setor-metroferroviario-20122013.pdf>> Acesso em: 07 de nov. 2016.

Portal Banco Mundial. Disponível em:

<<http://www.worldbank.org/projects/procurement/noticeoverview?lang=pt&id=OP00002461>> Acesso em: 26 de jul. 2015.

Portal Centro Regional de Informação das Nações Unidas. Disponível em:

<<http://www.unric.org/pt/actualidade/31919-onu-projeta-que-populacao-mundial-chegue-aos-85-mil-milhoes-em-2030>> Acesso em: 12 de out. 2016.

Portal CPTM. Disponível em:

<<http://www.cptm.sp.gov.br/>> Acesso em 10 out. 2011.

<<http://www.cptm.sp.gov.br/Linhas/Default.asp#!linha-11>> Acesso em: 10 out. 2011.

<<http://www.cptm.sp.gov.br/a-companhia/Pages/Nossa-Historia.aspx>> Acesso em: 15 fev. 2016.

Portal Direitonet. Disponível em:

<<http://www.direitonet.com.br/artigos/exibir/4434/Conceitos-basicos-da-licitacao-publica>> Acesso em: 19 jul. 2015.

Portal Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística São Paulo. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/projecao_da_populacao/2008/default.shtm> Acesso em: 10 out. 2011.

<<http://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>> Acesso em: 22 set. 2016.

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/projecao_da_populacao/2013/default_tab.shtm> Acesso em: 12 out. 2016

Portal Planalto. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8666cons.htm> Acesso em: 19 jul. 2015.

Portal Metrô São Paulo. Disponível em:

<<http://www.metro.sp.gov.br/index.asp>> Acesso em: 10 out. 2011.

<<http://www.metromemoria.com.br/conteudo.html#>> Acesso em: 10 out. 2011.

<<http://www.metro.sp.gov.br/aplicacoes/news/tenoticiasview.asp?id=65655306E4&categoria=6561F2&idioma=PO>> Acesso em: 11 nov. 2011.

Portal National Instruments. Disponível em:

<<http://sine.ni.com/cs/app/doc/p/id/cs-14902>> Acesso em: 19 abr. 2015.

Portal Secretária dos Transportes Metropolitanos. Disponível em:

<<http://www.stm.sp.gov.br/index.php/planos-e-projetos/pitu-2020>> Acesso em: 11 nov. 2011.

Portal Senado Federal. Disponível em:

<<https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/outras-publicacoes/volume-ii-constituicao-de-1988-o-brasil-20-anos-depois.-o-exercicio-da-politica/a-licitacao-na-constituicao-de-1988>> Acesso em: 16 out. 2016.

Portal Sistema Estadual de Análise de Dados. Disponível em:

<https://www.seade.gov.br/produtos/midia/spdemografico/spdemog_jan2014.pdf>

Acesso em: 12 out. 2016.

<<http://produtos.seade.gov.br/produtos/projpop/>> Acesso em: 12 out. 2016.

STEIMEL, A. Electric railway traction in Europe. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 2, n. 6, p. 7-17, nov. / dec. 1996.

TOLEDO, E. D. et al. **Tração elétrica**. São Paulo: Nobel, 1987. v.1. 371p.

TOLEDO, E. D. et al. **Tração elétrica**. São Paulo: Nobel, 1988. v.2. 309p.

VALENTIM, R. M. Análise gráfica dos cálculos cinemáticos e elétricos via software da simulação de marcha de composição ferroviária. In: CONGRESSO NACIONAL DAS ENGENHARIAS DA MOBILIDADE: DESAFIOS DO TRANSPORTE EFICIENTE E SUSTENTÁVEL. 2. **Anais...** Joinville, 2015.

WOJTAS, B. J. The age of the squirrel cage. **IEE Review**, v. 36, n. II, p. 435-438, dec. 1990.

ANEXO A - Dados resumidos do percurso

Resumo das informações da metragem x gradiente (rampa) - Tabela 6:

Para um melhor entendimento da Tabela 6, tem-se um gradiente de -2,3 iniciando em 0 m até 491 m, e em 491 m há uma mudança do gradiente para -6,2 até 601 m e assim sucessivamente.

Tabela 6 – metragem x gradiente (rampa)

Metragem (m)	Gradiente (Rampa)
0,000	-2,300
491,000	-6,200
601,000	-10,900
901,000	-8,100
1051,000	-4,400
1201,000	-0,700
1346,000	6,500
1611,000	2,200
.....	
3706,000	5,300
3916,000	5,700
4176,000	5,300
4296,000	7,100
.....	
8016,000	-5,100
8206,000	-6,000
8376,000	-7,300
8786,000	-8,800
8946,000	-7,700
9056,000	-8,500
9126,000	-5,400
9276,000	-0,600
9396,000	0,600
9616,000	3,800
9676,000	6,600
9756,000	9,300
9916,000	5,300
10096,000	0,500
.....	
10206,000	-1,200
10356,000	-0,700
10556,000	0,900
10686,000	3,500
10856,000	5,300
11076,000	4,200
11246,000	2,200
11436,000	8,800
11586,000	0,300
11796,000	0,000
11896,000	0,200
12096,000	0,100

Metragem (m)	Gradiente (Rampa)
12196,000	4,600
12256,000	8,600
.....	
15763,000	-2,100
15853,000	-12,400
15993,000	-1,600
16153,000	-4,700
16303,000	-6,700
16363,000	-3,500
16483,000	-0,100
16708,000	2,800
16939,120	4,400
17063,986	-5,900
17496,493	-13,900
18087,652	0,000
18417,666	2,000
18618,466	-11,630
18986,366	-34,070
19285,766	-21,020
19437,966	12,150
19572,666	3,180
19781,666	-28,910
19947,266	-33,760
20181,066	-29,000
.....	
20335,466	-24,710
20509,166	0,000
20886,766	-39,790
21042,466	-36,110
21154,166	5,280
21349,766	4,200
21389,766	5,300
21526,966	6,290
21565,966	5,280
21709,066	12,460
22279,066	0,000
22632,766	-35,200
22882,766	0,000
23105,966	-1,920
23366,466	21,880
23478,466	21,550
23586,766	2,190
23827,366	1,000
23877,466	2,190
24017,766	0,000
24249,000	12,200
24519,000	4,300
.....	
28775,000	-18,800
28865,000	-21,300
28940,000	-20,200

Metragem (m)	Gradiente (Rampa)
29025,000	-16,700
29160,000	-11,300
29240,000	-6,100
29345,000	-15,800
29445,000	-18,500
29565,000	-19,400
29705,000	-17,300
29855,000	-19,700
29920,000	-17,400
30040,000	-13,600
.....	
30095,000	-9,400
30240,000	-7,400
30500,000	-5,400
30715,000	-5,000
30766,000	-3,700
30856,000	-4,400
30956,000	-3,000
31096,000	-2,500
31306,000	-4,400
31436,000	-4,800
31836,000	-3,400
31986,000	-4,500
32076,000	-3,300
32346,000	-5,000
32546,000	-6,500
32626,000	-3,400
32686,000	-3,300
32816,000	-2,600
.....	
38166,000	-2,600
38421,000	-2,800
38756,000	-1,200
38901,000	0,500
39356,000	1,700
39571,000	3,100
39771,000	5,600
40016,000	1,600
.....	
40336,000	-6,400
40546,000	-4,600
40756,000	-1,400
41036,000	1,200
41216,000	-0,100
41356,000	-1,500
41436,000	-3,700
41566,000	-2,100
41701,000	-0,400
41826,000	0,000
42086,000	-1,200
42186,000	0,200

Metragem (m)	Gradiente (Rampa)
.....	
49221,000	1,900
49481,000	3,200
49581,000	1,800
49686,000	5,200
49841,000	3,800
49991,000	-8,300
50061,000	-2,300
.....	
50231,000	-1,300
50530,000	-0,900
50771,000	5,100
50891,000	7,700
50957,000	-7,700
51023,000	-5,100
51143,000	0,900
51384,000	1,300
51683,000	2,300
51853,000	8,300
51923,000	-3,800
52073,000	-5,200
52228,000	-1,800
52333,000	-3,200
57998,000	-1,100
58383,000	0,400
58758,000	-0,400
59083,000	1,000
59148,000	-1,000
59408,000	-0,400
59608,000	-0,200
59728,000	1,200
59828,000	0,000
60088,000	0,400
.....	
60213,000	2,100
60348,000	3,700
60478,000	1,500
60558,000	0,100
60698,000	-1,200
60878,000	1,400
61158,000	6,400
61578,000	4,600
61668,000	-1,600
61898,000	-5,600
62143,000	-3,100
62343,000	-1,700
62558,000	-0,500
63013,000	1,200
63158,000	2,800
63493,000	2,600
63748,000	-0,500

Metragem (m)	Gradiente (Rampa)
63848,000	-3,800
63993,000	-0,800
69368,000	5,000
69568,000	3,300
69838,000	4,500
69928,000	3,400
70078,000	4,800
.....	
70478,000	4,400
70608,000	2,500
70818,000	3,000
70958,000	4,400
71058,000	3,700
71148,000	5,000
.....	
79031,234	35,200
79281,234	0,000
79634,934	-12,460
80204,934	-5,280
.....	
80348,034	-6,290
80387,034	-5,300
80524,234	-4,200
80564,234	-5,280
80759,834	36,110
80871,534	39,790
81027,234	0,000
81404,834	24,710
81578,534	29,000
81732,934	33,760
88721,000	-8,100
88811,000	-10,800
89051,000	-9,400
89211,000	-8,300
89311,000	-9,100
89401,000	-6,500
89511,000	-8,600
89658,000	-4,600
89718,000	-0,100
89818,000	-0,200
90018,000	0,000
90118,000	-0,300
90328,000	-8,800
.....	
97618,000	-5,300
97738,000	-5,700
97998,000	-5,300
98208,000	-3,500
98288,000	-4,100
98708,000	-4,200
98988,000	-3,200

Metragem (m)	Gradiente (Rampa)
99188,000	-5,600
99358,000	-9,300
99408,000	-0,300
99668,000	-2,200
100303,000	-6,500
100568,000	0,700
100713,000	4,400
100863,000	8,100
101013,000	10,900
101313,000	6,200
101423,000	2,300
101914,000	2,300

Fonte: Autor.

Resumo das informações da metragem x curva (raio) - Tabela 7:

Para um melhor entendimento da Tabela 7, tem-se um raio de 1230 m iniciando em 1035 m até 1955 m, o trem sai do raio e entra em uma reta entre 1955 m e 2416 m, onde em 2416 m começa um novo raio de 266 m até 2596 m e assim sucessivamente.

Tabela 7 – metragem x curva (raio)

Metragem (m)	Curvas (Raio) - m
0,000	0,000
1035,000	1230,000
1955,000	0,000
2416,000	266,000
2596,000	0,000
2606,000	191,000
2856,000	0,000
6236,000	1448,000
6346,000	0,000
6426,000	1275,000
6506,000	0,000
.....	
13633,000	506,000
14133,000	0,000
15028,000	513,000
15173,000	0,000
15228,000	384,000
15548,000	0,000
15803,000	465,000
15983,000	0,000
16023,000	206,000
16403,000	0,000
16553,000	287,000
16703,000	0,000
16856,000	50425,000
17197,000	0,000
17528,000	504,250

Metragem (m)	Curvas (Raio) - m
31444,000	0,000
33694,000	285,000
34024,000	0,000
37854,000	513,000
38224,000	0,000
40004,000	449,000
40454,000	0,000
41104,000	382,000
41414,000	0,000
.....	
51080,000	0,000
51878,000	511,000
51948,000	0,000
.....	
58740,000	0,000
60500,000	382,000
60810,000	0,000
61460,000	449,000
61910,000	0,000
63690,000	513,000
64060,000	0,000
67890,000	285,000
68220,000	0,000
70470,000	739,000
70610,000	0,000
71956,000	455,000
72216,000	0,000
.....	
77698,000	0,000
77966,000	500,000
78228,000	0,000
.....	
94568,000	1461,000
94618,000	0,000
94668,000	1574,000
94908,000	0,000
95048,000	2000,000
95178,000	0,000
95408,000	1275,000
95488,000	0,000
95568,000	1448,000
95678,000	0,000
99058,000	191,000
99308,000	0,000
99318,000	266,000
99498,000	0,000
99959,000	1230,000
100879,000	0,000
101914,000	0,000

Fonte: Autor.

Resumo das informações da metragem x localização da estação – Tabela 8:

Para um melhor entendimento da Tabela 8, tem-se a estação 1 em 0 m, posteriormente a estação 2 em 2246 m e assim sucessivamente.

Tabela 8 – metragem x localização da estação

Metragem (m)	Estação
0,000	Estação 1
2246,000	Estação 2
6611,000	Estação 3
18241,000	Estação 4
20631,050	Estação 5
22396,600	Estação 6
24087,850	Estação 7
27386,000	Estação 8
30391,000	Estação 9
33433,000	Estação 10
34676,000	Estação 11
37366,000	Estação 12
42694,000	Estação 13
46184,000	Estação 14
49481,000	Estação 15
50957,000	Estação 16
52433,000	Estação 15
55730,000	Estação 14
59220,000	Estação 13
64548,000	Estação 12
67238,000	Estação 11
68481,000	Estação 10
71523,000	Estação 9
74528,000	Estação 8
77826,150	Estação 7
79517,400	Estação 6
81282,950	Estação 5
83673,000	Estação 4
95303,000	Estação 3
99668,000	Estação 2
101914,000	Estação 1

Fonte: Autor.

Resumo das informações da metragem x restrição de velocidade – Tabela 9:

Para um melhor entendimento da Tabela 9, tem-se uma restrição de velocidade de 90 km/h iniciando em 0 m até 2246 m, e em 2246 m há uma mudança da velocidade para 20 km/h até 2596 m e assim sucessivamente.

Tabela 9 – metragem x restrição de velocidade

Metragem (m)	Restrição de velocidade (km/h)
0,000	90,000
2246,000	20,000
2596,000	90,000
2606,000	49,753
2856,000	90,000
11151,000	71,729
11406,000	90,000
12363,000	63,894
12533,000	90,000
13053,000	72,627
13233,000	90,000
13633,000	80,980
14133,000	90,000
15028,000	81,538
15173,000	90,000
15228,000	70,545
15548,000	90,000
15803,000	77,630
15983,000	90,000
16023,000	51,670
16403,000	90,000
16553,000	60,988
16703,000	90,000
17528,000	80,840
17808,000	90,000
18418,000	87,000
18560,000	90,000
18781,000	72,449
18967,000	73,404
19325,000	90,000
23157,000	80,498
.....	
26518,000	75,084
26748,000	90,000
26848,000	63,894
27088,000	90,000
27108,000	64,197
27558,000	90,000
28178,000	54,359
28548,000	90,000
28638,000	73,426
29118,000	90,000
.....	
37854,000	81,538
38224,000	90,000
40004,000	76,283
40454,000	90,000
41104,000	70,361
41414,000	90,000
49966,000	81,379

Metragem (m)	Restrição de velocidade (km/h)
50036,000	90,000
51877,018	81,379
51947,018	90,000
60499,018	70,361
60809,018	90,000
61459,018	76,283
61909,018	90,000
63689,018	81,538
64059,018	90,000
67889,018	60,775
.....	
77046,040	90,000
77071,713	80,498
77130,872	90,000
77373,976	88,182
77466,934	90,000
77474,755	80,498
77698,050	90,000
77965,652	80,498
78036,718	90,000
78046,718	80,498
78227,259	90,000
78413,082	80,498
78492,598	90,000
78549,852	80,498
78755,542	90,000
82259,088	50,000
.....	
85511,000	51,670
85891,000	90,000
85931,000	77,630
86111,000	90,000
86366,000	70,545
86686,000	90,000
86741,000	81,538
86886,000	90,000
87781,000	80,980
88281,000	90,000
88681,000	72,627
88861,000	90,000
89381,000	63,894
89551,000	90,000
90508,000	71,729
90763,000	90,000
99058,000	52,909
99308,000	90,000
99318,000	20,000
99668,000	90,000
101914,000	90,000

Fonte: Autor.

APÊNDICE A – Composição do Edital

No exemplo do Edital utilizado, tem-se o seguinte:

Concorrência Pública Nº STM 001/09

Fornecimento de 9 (nove) Trens, com 8 (oito) carros cada, para o Estado de São Paulo

Secretaria dos Transportes Metropolitanos - STM

Companhia Paulista de trens Metropolitanos De São Paulo - CPTM

Composição do Edital:

- 1 – Finalidade
- 2 – Normas aplicáveis
- 3 – Condições e requisitos gerais
- 4 – Materiais do carro
- 5 – Caixa e sistema
- 6 – Truques
- 7 – Sistema de Tração e Freagem Elétrica
- 8 – Sistema de Freagem por atrito
- 9 – Sistemas auxiliares
- 10 – Sistema de comunicação
- 11 – Equipamento de sinalização e controle de bordo - CBTC
- 12 – “Data Bus”
- 13 – Confiabilidade, plano de manutenção, durabilidade mínima, CDMS e EMC
- 14 – Ensaio em equipamentos
- 15 – Ensaio geral dos carros / trem prontos

APÊNDICE B - Descrição técnica básica da instalação dos componentes do sistema de tração

B.1 Motor de indução

Cada carro motor possui dois truques e em cada um deles são instalados dois motores de tração. Os motores estão acoplados a caixas de engrenagens que movem o eixo do rodeiro, com uma relação de 7,307:1 por exemplo.

Os motores são do tipo de indução, autoventilados, trifásicos, abertos, tipo gaiola de esquilo e estão conectados dois a dois em paralelo. Os motores são projetados para montagem diretamente no bastidor do truque.

Uma extremidade do eixo do motor está acoplada ao redutor e na posição oposta está montada uma roda dentada. O sensor de velocidade fica instalado sobre esta roda dentada e suas saídas fornecem sinais de velocidade a uma unidade de controle, uma unidade eletrônica de controle de freio de atrito e ao ATC de bordo.

B.2 Filtro de entrada

O filtro de linha ou indutor de linha de corrente contínua é um indutor de núcleo refrigerado a ar com a saída de ar do inversor de frequência, detalhado a seguir:

- a bobina do indutor é composta por um número de discos isolados em série;
- a armazenagem pode ser realizada dentro de uma estrutura metálica (caixa);
- normalmente é montado com proteções de malha que resguardam contra partículas flutuantes como fuligem, pó, e outros resíduos da via que poderiam danificar o isolamento da bobina do indutor e também para prevenir o contato acidental com circuitos elétricos abertos;
- O filtro de entrada está conectado à alimentação e ao interruptor de conexão de aterramento do inversor. Observação: quando o equipamento está isolado, os circuitos de entrada correspondentes estão conectados ao cabo terra por razões de segurança.

O indutor faz parte de um filtro LC na fonte de alimentação de corrente contínua. O mesmo é utilizado para reduzir correntes de retorno na fonte de alimentação, proteger o equipamento contra oscilações bruscas da tensão e

proporcionar uma fonte de corrente contínua estabilizada para os inversores de tração.

Do ponto de vista da freagem regenerativa do sistema de potência, tem-se o fluxo de corrente através do indutor nos dois sentidos, ou seja, também estabiliza a corrente para retorno na linha de alimentação do fornecimento de energia.

B.3 Resistor de freagem

Cada conjunto do resistor de freagem normalmente é composto de dois bancos resistivos e uma barreira térmica intermediária. O mesmo é preparado do lado de fora da caixa do inversor de frequência e é utilizado na parte reostática do sistema de freagem.

O freio reostático é utilizado quando não há outra carga disponível para absorver energia regenerada e aumenta a tensão da linha. A resistência do freio é então ligada ao circuito de freagem através dos IGBTs para reduzir a tensão, permitindo absorver a energia dos motores.

O sistema combina utilização do freio regenerativo e reostático. Essa combinação é realizada de forma automática.

Uma outra tecnologia combina a freagem mecânica com a freagem elétrica. Os motores de tração passam a operar como geradores fornecendo torque negativo.

B.4 Inversor de frequência

O inversor de frequência ou como é chamado, módulo de potência, pois não possui só o inversor, como é descrito a seguir: um módulo de potência que executa as funções do inversor, do interruptor reostático no momento da freada e a estratégia do controle dos IGBTs é realizado pelo PWM. O sistema de refrigeração, os condensadores do filtro e a resistência da descarga finalizam o módulo de potência. Cada módulo IGBT tem internamente dois transistores e dois diodos.

O módulo do inversor de propulsão de IGBT fornece uma alimentação de tensão e frequência variáveis aos quatro motores de tração, ou seja, um carro motor. O inversor consiste de dispositivos de potência IGBT (dois dispositivos por fase) e dispositivos de potência IGBT para o corte reostático durante a freada elétrica.

Convencionalmente o módulo do inversor IGBT vem montado no compartimento do módulo de potência. As palhetas do dissipador de calor do módulo do inversor são estendidas dentro do condutor de ar central localizado na caixa do inversor de frequência.

O ar do ventilador de esfriamento que passa sobre as palhetas do dissipador de calor e que as esfria, como também o módulo do inversor. O módulo do inversor é um dispositivo completo de tensão trifásico com uma fase de fredda e consiste de dispositivos de comutação IGBT e componentes associados que vêm todos montados em um dissipador com conexão de aterramento.

APÊNDICE C – Motor de corrente alternada e o inversor de frequência

C.1 Motor de corrente alternada e corrente contínua

O motor assíncrono é uma máquina elétrica trifásica alimentada por uma rede de três tensões de amplitude e frequência determinada (ALLENBACH et al., 2008).

De acordo com Augusto Júnior (2007), os motores elétricos são máquinas que transformam energia elétrica em energia mecânica. A conversão eletromecânica de energia se processa através da interação de campos magnéticos.

Caso a energia elétrica que alimenta o motor seja de Corrente Contínua (C.C.), o motor é denominado de motor C.C.; se a energia elétrica que alimenta o motor for de Corrente Alternada, o motor é denominado de motor C.A., podendo ser monofásico ou trifásico.

Os princípios básicos que explicam a operação dos motores C.C. e dos motores C.A. são os mesmos e são decorrentes das mesmas leis básicas (como, por exemplo, a lei circuital de Ampere, a lei da f.e.m. induzida de Faraday). Os motores C.C. e motores C.A. diferem entre si devido a detalhes de construção e características de funcionamento, mas os princípios que regem a operação são os mesmos.

Os motores mais largamente utilizados são os trifásicos, C.A., tipo assíncronos, também denominados de motores de indução. Atualmente o Brasil fabrica mais de 100.000 unidades/mês de motores de indução, desde potências de 1/4 c.v até os motores de grandes sistemas de bombeamento de 10.000 c.v. O princípio de funcionamento desses motores fundamenta-se na indução eletromagnética proporcionada por um campo magnético variável atravessando os enrolamentos do rotor. Esse tipo de motor corresponde a mais de 90 % dos motores instalados nos diversos setores de atividade industrial e residencial.

C.2 Inversor de frequência

Os conversores CA/CA, normalmente denominados no mercado industrial de inversores de frequência, são dispositivos fundamentados na moderna eletrônica de potência, que aplicados aos motores MTI controlam com precisão a rotação, nos diversos tipos de carregamentos e em amplo intervalo de velocidade. O grande desenvolvimento da eletrônica de potência e da microeletrônica proporcionou um grande avanço nos dispositivos de acionamento eletrônicos baseados na variação da frequência de alimentação de motores de indução, onde o acionamento dos

veículos de tração elétrica empregando motores trifásicos e controlados através de tiristores constitui um dos marcos de maior importância no desenvolvimento da tração elétrica (AUGUSTO JÚNIOR, 2008) e (MARTINS, 1986).

De acordo com Nakamura et al. (2008), os inversores de frequência são conversores estáticos destinados a controlar o fluxo de energia elétrica entre uma fonte de tensão contínua e uma carga em corrente alternada monofásica ou polifásica, com controle dos níveis de valor eficaz da tensão e da frequência, dependendo da aplicação.

Para o trabalho em questão, foi utilizada uma das principais aplicações dos inversores de frequência, ou seja, acionamento de máquinas elétricas de corrente alternada.

Os inversores de frequência são geralmente classificados em dois tipos: inversor de onda quadrada e o inversor de modulação de largura de pulso (PWM) (BOSE, 1981).

C.2.1 Inversor de frequência e o sistema de tração

No passado, o controle de velocidade nos acionamentos que envolvia grande potência foi realizado principalmente com os motores C.C. ou em alternativa, com menor rigor de precisão, através dos motores MTI de rotor bobinado, com o agravante de grande dispêndio de energia (AUGUSTO JÚNIOR, 2008).

No campo industrial, a aplicação de inversores de frequência em bombas, ventiladores, translação de pontes rolantes, sistemas de içamentos de cargas, mesas de rolos, laminadores, entre outros, tornaram-se uma realidade. Ao longo dos tempos, com o aumento das cargas transportadas e o aumento da velocidade média das composições combinadas aos custos da manutenção dos motores de corrente contínua, abriram espaço para a introdução do motor MTI na tração elétrica (ALOUICHE, 1992); (PIRES, 2002) e (AUGUSTO JÚNIOR, 2008).

Além dos ótimos resultados observados em relação à controlabilidade, comparáveis aos tradicionais acionamentos de motores de corrente contínua, onde de acordo com Wojtas (1990) quando utilizados em tração possuíam itens vulneráveis, como: escova e comutadores, enrolamento de armadura, isolamento e conexões com os comutadores delicados, acabam representando trabalho extra, pois além da rotina normal de manutenção, havia a necessidade de substituir a escova, limpar o comutador e realizar revisões. Sendo assim, os custos operacionais

são reduzidos, uma vez que não existem escovas para serem trocadas e comutadores para serem retificados. Os motores com comutadores possuem limitação na capacidade de fornecer potência nominal em altas velocidades por causa do faiscamento excessivo do comutador, sendo a principal vantagem do motor de indução do tipo gaiola sobre os tradicionais motores do tipo série, a ausência de comutadores. (LARGIADÈR, 1970) e (ALOUICHE, 1992).

Allenbach et al. (2008) afirma que apesar das dificuldades de desenvolver inversores, esta solução permitiu resolver muitos problemas dos motores de tração assíncronos com frequência variável e considerando-se os testes realizados na locomotiva DC 14000, através da SNCF e as Oficinas da Construção de Oerlikon em 1957, como os pioneiros de um sistema de transmissão, que 30 anos mais tarde revelou que o sistema eletrônico de potência permitiu alcançar fontes de tensão trifásica variável em frequência e amplitude.

Os inversores de frequência possuem também, considerável redução do consumo de energia, quando comparado com métodos de acionamentos convencionais para motores de indução. Nos sistemas automatizados o controle de velocidade por inversores substitui os acionamentos que utilizam bancos de resistências no circuito rotórico de motores de indução, ou mesmo nos acionamentos com motores C.C., com significativa economia de energia elétrica. Com o crescente custo das tarifas de energia elétrica, o desenvolvimento dos conversores estáticos de frequência e o aumento da competitividade no meio industrial, onde a melhoria da qualidade dos produtos e a redução dos custos de produção tem se tornado exigências cada vez maiores, a utilização de acionamentos mais eficientes e com menor custo operacional ficou cada vez mais aplicada (AUGUSTO JÚNIOR, 2008).

APÊNDICE D – Resumo da evolução do sistema metroferroviário em São Paulo

Segundo os portais Metrô - Memória e CPTM - Nossa História, pode-se acompanhar a evolução do metrô e trem através da linha do tempo a seguir:

1927 - O primeiro projeto de um sistema integrado de transporte metropolitano é apresentado à Prefeitura de São Paulo. Nessa época, a cidade já é a maior e a mais industrializada do país e o transporte público, restrito a linhas de bonde, que não conseguem suprir a demanda crescente. O Plano da Light, como fica conhecido, prevê a construção de vias subterrâneas interligadas às linhas dos bondes.

1947 - A chegada em massa de migrantes de outras partes do país acelera expansão demográfica de São Paulo. Entre 1944 e 1950, a população da cidade passa de 1,4 milhão para 2,2 milhões de habitantes. Novos projetos para o metrô são propostos. Neste mesmo ano, técnicos da França sugerem a criação de duas linhas: uma na direção norte-sul e outra na leste-oeste. O plano não avança por falta de recursos.

1966 - Favorecido por uma reforma fiscal que amplia os recursos municipais, o prefeito José Vicente Faria Lima cria o Grupo Executivo do Metropolitano (GEM), antecessor da Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô). Aberta a concorrência para a construção do novo meio de transporte, o órgão recebe vários projetos de empresas nacionais e estrangeiras interessadas em tocar a obra. Em 26 de dezembro, Faria Lima assina a lei municipal 6.988, que autoriza a criação da Companhia do Metropolitano de São Paulo.

1968 - Em 24 de abril é fundada a Companhia do Metropolitano de São Paulo. Em 14 de dezembro começam as obras da Linha Norte-Sul, atualmente chamada Linha 1-Azul.

1974 - Em janeiro são entregues os dois primeiros trens metroviários fabricados pela indústria nacional, com base no protótipo montado com componentes importados. Em 14 de setembro começa a operação comercial do Metrô. Os trens são operados manualmente até outubro, quando é inaugurado o Centro de Controle de Operações (CCO), que comanda o funcionamento automático do sistema. Até novembro, cerca de 300 mil pessoas são transportadas.

1981 - Dois recordes são atingidos. Em abril, o número de passageiros transportados chega a 1 bilhão. Em novembro, após a extensão do trecho em

operação da Linha 3-Vermelha até a Estação Tatuapé, a demanda da rede ultrapassa pela primeira vez a marca de 1 milhão de passageiros por dia.

1984 - Em 25 de janeiro, o Metrô bate seu recorde de passageiros por dia: 1,726 milhão. No seu décimo ano de operação, o sistema registra outra marca representativa ao ultrapassar 2 bilhões de usuários transportados.

1988 - No primeiro ano de funcionamento total da Linha 3-Vermelha, a demanda nos 15 minutos mais movimentados do dia é uma das maiores do mundo, ultrapassando 6,5 mil passageiros por hora em cada sentido. Ainda em 1988, o Metrô registra outras duas marcas importantes: a demanda diária ultrapassa 2 milhões de passageiros e o somatório histórico de usuários transportados chega a 4 bilhões.

1992 - A CPTM teve sua criação autorizada pela Lei nº 7.861, de 28 de maio de 1992, segundo a qual a nova Companhia deveria assumir os sistemas de trens da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) em substituição à CBTU – Companhia Brasileira de Trens Urbanos (Superintendência de Trens Urbanos de São Paulo STU/SP) e à FEPASA – Ferrovia Paulista S/A, de forma a assegurar a continuidade e melhoria dos serviços. Eram transportados diariamente 894 mil usuários.

1994 - A CPTM passa a operar efetivamente as atuais Linhas 7, 10, 11 e 12, em abril de 1994. A frota herdada se encontrava deteriorada, o que levou à implantação do Primeiro Programa de Modernização de Composições, envolvendo mais de 500 carros. O número de passageiros transportados por dia cai para 800 mil.

1996 - A CPTM passa a operar efetivamente as atuais Linhas 8 e 9. Total de usuários diários volta a subir para 835 mil.

1998 - PROJETO SUL- Começaram as obras de dinamização da Linha C (atual Linha 9) com o Projeto Sul de Trens Metropolitanos. CHEGADA DA SÉRIE 2100 - Vieram da Espanha 48 trens (três carros) reformados. Iniciam sua operação na Linha E (atual Linha 11) e, em seguida, foram removidos para as Linhas C e D (atuais Linhas 9 e 10).

2000 - EXPRESSO LESTE - Início da operação do Expresso Leste com novos trens equipados com ar-condicionado, bancos anatômicos e música ambiente. Entrega de quatro modernas estações: Corinthians-Itaquera, Dom Bosco, José Bonifácio e Guaianases. Média de usuários transportados pela CPTM retoma o crescimento: 869 mil/dia. PROJETO SUL – 1ª FASE - Inauguradas as estações Socorro, Granja Julieta, Hebraica Rebouças, Berrini, Morumbi, Cidade Jardim na Linha C (atual Linha 9 – Esmeralda).

2001 - PROJETO INTEGRAÇÃO CENTRO - Desenvolvido pela STM – Secretaria de Transportes Metropolitanos, por intermédio da CPTM, abrangendo três estações da Companhia num trecho de 7 km: Brás, Luz e Barra Funda. A média de usuários transportados por dia ultrapassa 1 milhão de pessoas. Entra em operação a nova estação Vila Olímpia.

2002 - PROJETO SUL - Continuação – Dinamização da Linha C (atual Linha 9) e entrada em operação da Linha 5 Lilás do Metrô.

2003 - EXPRESSO LESTE ATÉ A LUZ - Trens do Expresso Leste, que antes tinham estação terminal no Brás, passaram a circular até a Luz.

2004 - INTEGRAÇÃO NA LUZ - Início da integração gratuita na Estação Luz.

2005 - NOVAS ESTAÇÕES - Início da construção das estações Jardim Helena, Jardim Romano e USP Leste (Linha F, atual 12 Safira), Autódromo, Interlagos e Grajaú (Linha C, atual Linha 9 Esmeralda). BILHETE ÚNICO - Assinado convênio entre Estado e Município de São Paulo para implantação do Bilhete Único no sistema de transporte sobre trilhos, dentro da Região Metropolitana. PROGRAMA BOA VIAGEM - Início do Programa, com investimento de R\$ 388 milhões para recuperação, reforma e modernização de 45 trens.

2006 - NOVO FOCO - Inauguração do novo Centro de Controle Operacional, na Estação Brás, que gradualmente veio a unificar o controle das seis linhas operadas pela CPTM.

O Plano de Expansão 2007-2010, que prevê 19 bilhões de reais de investimentos nos sistemas de transporte metropolitanos paulistas, começou a ser implementado. Ao Metrô seria destinado um volume de recursos inéditos: 10,1 bilhões de reais, aplicados na construção de 22,4 quilômetros de linhas, na compra de 47 novos trens e na modernização da rede.

2007 - PASSAGEIROS TRANSPORTADOS - Alcançada a marca de 1,6 milhão de passageiros/dia, o dobro da média de 1999. Os intervalos entre trens passam a ser de seis minutos, nos horários de pico, nas atuais Linhas 9 e 11-Expresso Leste. EXTENSÃO DA LINHA C - Anúncio da extensão da atual Linha 9 até a nova Estação Varginha. MODERNIZAÇÃO DA LINHA F - Anúncio da modernização da atual Linha 12, com investimento inicial de R\$1,2 bilhão. TRENS REVITALIZADOS - Programa de modernização de frota envolvendo 45 trens. NOVOS TRENS - Além de 12 novos trens em processo de fabricação, a CPTM licitou a compra de mais 40 trens.

OPERAÇÃO PORTAS FECHADAS - Fim da circulação de trens com portas abertas na Linha F (atual Linha 12).

2008 - NOVOS NOMES DAS LINHAS - Com o objetivo de reafirmar a decisão do Governo Estadual de integrar a rede metroferroviária na Região Metropolitana de São Paulo, as linhas da CPTM ganharam novos nomes e cores, baseadas em pedras preciosas. NOVAS ESTAÇÕES - Foram inauguradas as novas estações de USP-Leste, Comendador Ermelino, Jardim Romano (Linha 12 Safira), Primavera-Interlagos e Grajaú (Linha 9 Esmeralda). FROTAS REFORMADAS - Com a entrega dos últimos três trens reformados, toda a frota da Linha 12 Safira passou a ser composta por trens novos ou reformados. Novos trens reformados também entram em operação na extensão da Linha 11 (Guaianases – Estudantes). TRENS DO PLANO DE EXPANSÃO - Foram entregues os primeiros trens novos previstos no Plano de Expansão dos Transportes Metropolitanos. Com capacidade para 1.200 usuários.

2009 - NOVOS TRENS - Início da fabricação de 40 novos trens e contratação da aquisição de mais 8 novas composições.

2010 - NOVOS TRENS - Recebimento de 21 modernos trens da série 7.000. Contratação de fornecimento de mais 9 trens. MANUTENÇÃO E NOVOS TRENS PARA A LINHA 8 - Contrato entre a CPTM e a CTRENS para manutenção dos trens da série 5000 inclui a renovação completa da frota destinada à Linha 8, com entrega de 36 novos trens da série 8000 a partir de julho de 2011. MODERNIZAÇÃO DA FROTA - Concluída a revisão de mais 33 trens. NOVO RECORDE - Em 10 de dezembro, registrado novo recorde de passageiros transportados: 2.408.342.

Ainda o Portal Metrô São Paulo, afirma que o Plano Plurianual [PPA] do Governo do Estado prevê investimentos de cerca de R\$ 39,4 bilhões para as duas empresas (CPTM e Metrô) até 2015.

Em 2011 já eram transportadas 2,6 milhões de usuários e estimava-se transportar 3,5 milhões de usuários por dia em 2014.

2011 - NOVOS TRENS - Entrega de 24 trens da série 7000 e 7 trens da série 7500. NOVO RECORDE - Em 11 de novembro (sexta-feira) foram transportados 2.686.220 passageiros, novo recorde operacional.

2012 - NOVOS TRENS - No total, 31 novas composições foram incorporadas à frota.

2013 - NOVOS TRENS - Entrega de novos trens. A frota da Linha 8 (Série 8000) é completamente renovada. Juntamente com a STM – Secretaria dos Transportes

Metropolitanos, a CPTM assina contratos para o fornecimento de mais 65 novos trens, totalizando um investimento na ordem de R\$ 1,8 bilhão. NOVOS TRECHOS - Assinados os contratos para as obras da extensão da Linha 9 até Varginha e da nova Linha 13 Jade (Trem do Aeroporto de Guarulhos). NOVAS ESTAÇÕES - Entrega da nova Estação Vila Aurora e da Estação São Miguel Paulista reconstruída. TREM REGIONAL SÃO PAULO-SOROCABA - Em audiência pública, a CPTM anuncia as características técnicas do Trem Regional entre as cidades de São Paulo e Sorocaba. NOVO RECORDE - Em 6 de dezembro, sexta-feira, a CPTM transportou 3.025.185 usuários.

2014 - NOVOS TRENS - Novos trens de 8 carros, da série 9000, para operação na Linha 11 – Coral). EXTENSÃO DA LINHA 8 – Diamante - Em Abril, foi inaugurada a Extensão da Linha 8 – Diamante, que agregou mais 6,3 Km à malha operacional da CPTM e mais duas estações: Amador Bueno e Santa Rita. ESTAÇÕES - A Linha 7 – Rubi ganha uma nova Estação Franco da Rocha (reconstruída). EXPANSÃO DA MALHA - Início das obras de construção da Linha 13 – Jade (Eng. Goulart – Guarulhos) e de extensão da Linha 9 – Esmeralda (Grajaú – Varginha).