

RODOLFO RAFAEL BERINO DA MOTTA

**Interligação física dos sistemas elétricos da Companhia Paulista de
Trens Metropolitanos**

Distribuição em 34,5 kV

São Paulo
2016

RODOLFO RAFAEL BERINO DA MOTTA

**Interligação física dos sistemas elétricos da Companhia Paulista de
Trens Metropolitanos**

Distribuição em 34,5 kV

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

São Paulo
2016

RODOLFO RAFAEL BERINO DA MOTTA

**Interligação física dos sistemas elétricos da Companhia Paulista de
Trens Metropolitanos**

Distribuição em 34,5 kV

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

Área de concentração:
Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Lobo Pires

São Paulo
2016

Catalogação-na-publicação

Motta, Rodolfo

Interligação física dos sistemas elétricos da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos: Distribuição em 34,5 kV / R. Motta – São Paulo, 2016.

39 p.

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

1. Ferrovia I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

RESUMO

Este trabalho tem como proposta realizar um estudo técnico e financeiro da alimentação das estações de passageiros e prédios da CPTM através de uma linha interna de distribuição em 34,5 kV vinda de subestações primárias existentes. Esta proposta se justifica pela quantidade de falhas apresentadas no fornecimento de energia para as estações de passageiros e na economia gerada se estas fossem alimentadas pelo subgrupo de tensão A4, ao invés de pelo subgrupo A2. Para tanto, inicialmente foram considerados as potências demandadas por estes novos pontos de carga para quantificar a quantidade de potência extra a ser requerida pelo sistemas de energia atual da CPTM e, comparando com a potência atualmente demandada, validar se o sistema suportaria tal carga. A validação deste modelo foi feito através de simulações em software, buscando a melhor performance para o circuito, dentro das premissas impostas e adotadas. Por fim, com os sistemas de interligação consolidados, foi realizado o estudo financeiro dos empreendimentos, dentro dos cenários previstos, contabilizando custos de intervenções e equipamentos necessários. E após, em posse dos valores de economia ao se trocar o fornecimento de tensão destes pontos de A4 para A2, foi mostrado uma previsão de retorno financeiro para estes investimentos.

Palavras-chave: Ferrovia. Subestação. Linha de distribuição. Estação.

ABSTRACT

This paper aims to perform a technical and financial study of the feeding of the passengers stations and buildings from the CPTM, through an internal distribution line in 34,5 kV, coming from existing primary substations. This proposal is justified by the amount of failures presented in providing energy for the passengers stations and the savings generated if they were fed by the voltage subgroup A4, rather than the subgroup A2. Thus, it was initially considered the demanded powers by these new charging points to quantify the amount of extra power to be required by the current power systems of the CPTM and, compared to the currently demanded power, validate that the system would support such a charge. The validation of this model was done by a simulation software, searching for the best performance for the circuit within the imposed and adopted assumptions. Finally, with the consolidated interconnection systems, the financial study of the projects was carried out within the prescribed scenarios, accounting costs of necessary interventions and equipment. And after, in possession of saving values when switching the supply voltage of these points from A4 to A2, a financial forecast return was shown to these investments.

Keywords: Railway. Substation. Distribution line. Station.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Eletrificação das linhas 7 e 10, nos anos de 1950	14
Figura 2.2 - Detalhe do poste da linha 7, com rede aérea de tração, sinalização e 34,5 kV	16
Figura 2.3 - Seção tipo do banco de dutos da extensão da Linha 9.....	16
Figura 2.4 - Distribuição dos bancos de dutos	17
Figura 3.1 - Trechos com rede de distribuição de 34,5 kV, ou em execução	22
Figura A.1 - Circuito para simulação das linhas 7 e 10	31
Figura A.2 - Circuito para simulação da linha 8.....	32
Figura A.3 - Circuito para simulação da linha 9.....	33
Figura A.4 - Circuito para simulação da linha 11	33
Figura A.5 - Circuito para simulação da linha 12.....	34
Figura A.6 - Circuito para simulação da linha 13.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Padrões de entrada das estações e prédios	13
Tabela 2.2 - Divisão das subestações da CPTM.....	15
Tabela 2.3 - Demonstrativo de falhas de fornecimento de energia nas estações	18
Tabela 3.1 - Economia prevista para fornecimento em A2, no mercado livre	20
Tabela 3.2 - Configuração dos circuitos de interligação em 34,5 kV	21
Tabela 3.3 - Trecho restante para execução de rede de distribuição em 34,5 kV.....	23
Tabela 3.4 - Demandas para as subestações do sistema de 34,5 kV.....	25
Tabela 3.5 - Comparativo entre Demanda a Contratar e Demanda Simulada	26
Tabela 3.6 - Comparativo de custo dos modelos de distribuição	26
Tabela 3.7 - Custo Total da Integralização em 34,5 kV.....	27
Tabela 3.8 - Previsão de retorno dos investimentos	28

LISTA DE QUADROS

Quadro A.1 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda líquida para os empreendimentos da linha 7 - Rubi.	35
Quadro A.2 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda líquida para os empreendimentos da linha 8 - Diamante.	36
Quadro A.3 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda líquida para os empreendimentos da linha 9 - Esmeralda.....	37
Quadro A.4 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda líquida para os empreendimentos da linha 10 - Turquesa.....	38
Quadro A.5 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda líquida para os empreendimentos da linha 11 - Coral.	38
Quadro A.6 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda líquida para os empreendimentos da linha 12 - Safira.	39
Quadro A.7 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda líquida para os empreendimentos da linha 13 - Jade.	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGU – Aeroporto

ARS – Ayrton Senna

BCB – Brás Cubas

BFU – Barra Funda

CA – Corrente Alternada

CAI – Caieiras

CC – Corrente Contínua

CDU – Cidade Universitária

CLP – Campo Limpo Paulista

CPTM – Companhia Paulista de Trens Metropolitanos

CVN – Calmon Viana

DBO – Dom Bosco

EGO – Engenheiro Goulart

EMF – Engenheiro Manoel Feio

ERM – Ermelino Matarazzo

EWB – *Electronic Workbench*

FMO – Francisco Morato

GUA – Guaianases

ILE – Imperatriz Leopoldina

ISP – Engenheiro São Paulo

ITQ – Itaquera

JAG – Jaguaré

JKI – Jandira

JRG – Jaraguá

MAU – Mauá

MRB – Morumbi

MVN – Mendes

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

OSA – Osasco

PTR – Patriarca

RPI – Ribeirão Pires

SAN – Santo André

SCT – São Caetano do Sul

SE – Subestação

SGU – Sebastião Gualberto

SOC – Socorro

SRT – Santa Rita

STE – Santa Terezinha

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ_{cu} – Resistividade do cobre

A – Ampere (unidade corrente elétrica)

m – Metro (unidade de comprimento)

I_e – Corrente elétrica consumida

I_{SE} – Corrente elétrica à vazio da subestação

P_e – Potência demandada pelas estações

reg – Regulação

R_{cb} – Resistência do cabeamento

R_{SE} – Resistência interna da subestação

S_{cu} – Área de cobre

U_{vazio} – Tensão à vazio

U_{SE} – Tensão da subestação à carga máxima

VA – Volt-Ampere (unidade de potência elétrica)

V – Volt (unidade de tensão)

W – Watt (unidade de potência elétrica)

SUMÁRIO

RESUMO.....	3
ABSTRACT.....	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABELAS	6
LISTA DE QUADROS.....	7
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	8
LISTA DE SÍMBOLOS	10
1. INTRODUÇÃO	12
2. ESTADO DA ARTE.....	13
2.1. SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO DE ENERGIA DA CPTM.....	13
2.2. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	15
2.3. CONTRATOS DE FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	17
2.4. CONTRATAÇÃO DE OBRAS E SERVIÇOS NA CPTM.....	18
3. DESENVOLVIMENTO	20
3.1. DEMANDA E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DA CPTM.....	20
3.2. ESTUDO TÉCNICO DA INTERLIGAÇÃO EM 34,5 KV	21
3.2.1. Validação dos Circuitos de Distribuição em 34,5 kV.....	23
3.3. ESTUDO FINANCEIRO DA INTERLIGAÇÃO EM 34,5 KV	26
3.3.1. Previsão de Retorno dos Investimentos	27
CONCLUSÃO	29
REFERÊNCIAS.....	30
APÊNDICE A – Circuitos EWB para simulação em 34,5 kV	31
ANEXO A – Demanda líquida das estações	35

1. INTRODUÇÃO

Na CPTM, os sistemas de tração, que realiza a alimentação elétrica dos trens, e o de sinalização, que permite a movimentação desses trens na ferrovia, são alimentados através de subestações. Estas subestações podem ser primárias/retificadoras ou somente retificadoras. As subestações primárias são alimentadas pelas concessionárias de energia presentes nos 22 municípios atualmente atendidos pelas linhas da CPTM.

Essa alimentação é feita em 88/138 kV, e através de uma linha interna de distribuição, as subestações primárias alimentam as subestações retificadoras em 34,5 kV. Esse sistema de alimentação estava inicialmente presente apenas nas linhas 7-Rubi e 10-Turquesa, porém se tornou um padrão a ser adotado para todas as novas subestações retificadoras implantadas.

Esse nível de tensão se encaixa no subgrupo de fornecimento A2, enquanto que as estações de passageiros da CPTM, assim como seus prédios administrativos e oficinas são alimentados em média tensão, dentro do subgrupo A4 de fornecimento (2,3 a 25 kV), algumas ainda no subgrupo B, alimentados em baixa tensão. Os contratos em A2, além de representarem um sistema de fornecimento mais confiável, possui também tarifas mais vantajosas.

Neste ínterim, este trabalho visa estudar a alimentação das estações e prédios da CPTM através de uma linha interna de distribuição, aproveitando das instalações e equipamentos em 34,5 kV que a empresa já apresenta em certos trechos. Esta linha de distribuição será estudada sendo método aéreo ou pelo modelo de dutos enterrados, dois modelos atualmente utilizados na CPTM.

Além do estudo técnico desta interligação, um estudo financeiro desta intervenção se faz necessário. E em posse dos custos totais do empreendimento, será feito um comparativo com economia esperada ao se passar todos os contratos em A4 e B da empresa para A2, a fim de se prever um prazo de retorno financeiro para o investimento realizado.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO DE ENERGIA DA CPTM

Os sistemas da CPTM são alimentados em alta, média e baixa tensão. As estações da CPTM, devido a diferenças históricas de suas implantações, possuem desde alimentação em 220/127 V até as mais modernas, que são alimentadas em média tensão, mais precisamente em 13,8 kV. A CPTM possui em andamento um plano de modernização de seus estações, que prevê além de soluções de acessibilidade e segurança para os usuários, a padronização das entradas de todas as suas estações em 13,8 kV.

A CPTM possui atualmente 92 estações de passageiros, com 4 atualmente em construção: Mendes e Varginha, na extensão da Linha 9 – Esmeralda, e Guarulhos-CECAP e Aeroporto-Guarulhos, em sua nova linha 13 – Jade. Segundo Bianchin (2016), considerando essas novas estações, que totalizam então 96, e as 6 oficinas e prédio administrativos da CPTM, os padrões de entrada atualmente presentes na empresa são:

Tabela 2.1 - Padrões de entrada das estações e prédios

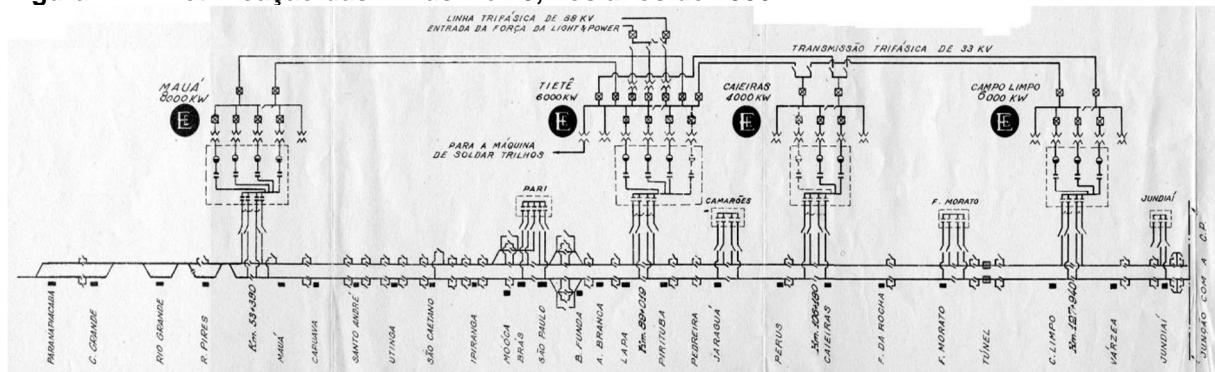
Linha	Nº de estações e prédios	Padrão de Entrada Atual	
		Baixa Tensão	Média Tensão
7	18	11	7
8	23	11	12
9	20	0	20
10	13	8	5
11	13	4	9
12	13	5	8
13	2	0	2
TOTAL	102	39	63

As alimentações em alta tensão da CPTM são, basicamente, para as suas subestações primárias/retificadoras. Uma das funções dessas subestações é retificar a energia recebida em alta tensão para o nível de 3 kV, corrente contínua, que alimenta o circuito de tração dos trens. Além disso, possui transformadores que

rebaixam a tensão aos níveis dos sistemas de sinalização de cada linha, e algumas dessas subestações primárias alimentam as subestações retificadoras em 34,5 kV. Estas subestações retificadoras então alimentam os sistemas de tração e sinalização.

Esse padrão de alimentação utilizando subestações apenas retificadoras surgiu na eletrificação das linhas 7 e 10, quando estas ainda formavam a Estrada de Ferro Santos a Jundiaí. De acordo com Gorni (2009), na ocasião da eletrificação desta ferrovia, a subestação Tietê recebia da concessionária a alimentação em 88 kV, que a rebaixava a 33 kV para então distribuir para as subestações Caieiras, Campo Limpo Paulista e Mauá.

Figura 2.1 - Eletrificação das linhas 7 e 10, nos anos de 1950



Fonte: Gorni (2009)

Essa distribuição interna nas linhas 7 e 10 é mantida até os dias atuais, sendo estendida para as subestações mais recentes dessas linhas, através de linhas redundantes de 34,5 kV. A subestação primária Pari, da linha 10, possui ainda um ramal que alimenta, também em 34,5 kV, a subestação Engenheiro São Paulo, da linha 11 – Coral.

Na busca de uma maior autonomia energética, a CPTM busca a expansão deste modelo de distribuição usado até então somente nas linhas 7 e 10 para suas demais linhas. Conforme apresentado em CPTM (2012), a nova subestação Guaianazes, da linha 11, possui alimentação em 34,5 kV proveniente da subestação Calmon Viana. A nova subestação retificadora a ser implantada na extensão da linha 9 até Grajaú será alimentado pela subestação primária de Cidade Dutra, também por linha de

distribuição interna. O mesmo ocorrerá com as subestações retificadoras Engenheiro Goulart e Aeroporto, que serão alimentadas pela subestação primária de Ayrton Senna, a serem implantadas na linha 13.

Fora esses exemplos, a companhia possui contratos em vigência para readequação dos seus sistemas de alimentação, prevendo mais linhas de distribuição para novas subestações alimentadas em 34,5 kV. A divisão das subestações da CPTM, considerando as subestações já com implantação prevista, é resumida na tabela a seguir:

Tabela 2.2 - Divisão das subestações da CPTM

Linha	Subestações Atuais		Subestações Futuras	
	Primárias	Retificadoras	Primárias	Retificadoras
7	2	3		
8	6			
9	3			3
10	2	1	1	1
11	4	1		1
12	3			
13			1	2
TOTAL	20	5	2	7

2.2. SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

O sistema de distribuição interna originário das linhas 7 e 10 é feito através de circuitos redundantes, apoiados na maioria de sua extensão nos próprios postes e pórticos que sustentam a rede aérea de tração e circuitos de sinalização. Esse modelo está sujeito a certas interferências, como regiões de viadutos, pontes ou mesmo nas estações de passageiros, onde é necessário o uso de posteamentos diferentes para um desvio do 34,5 kV.

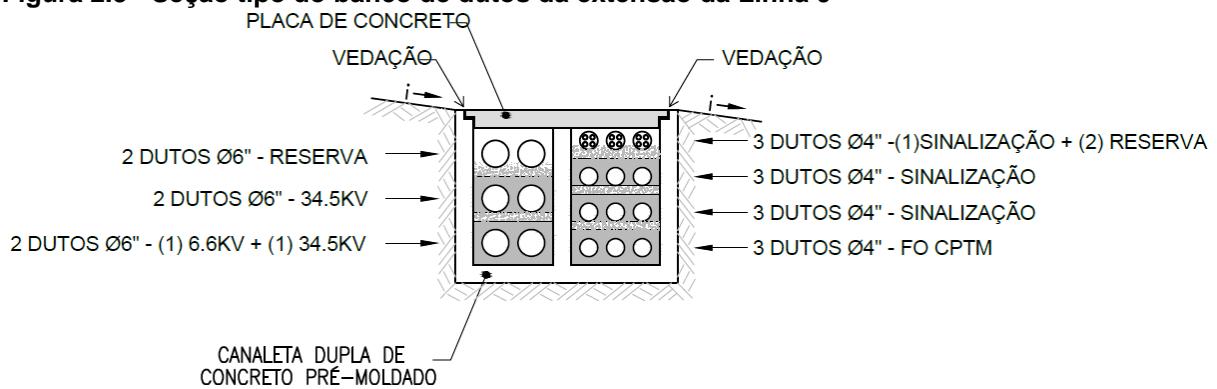
A proximidade desses circuitos também gera dificuldades de manutenção, pois para uma intervenção em um desses circuitos no poste, é preciso o desligamento de todos outros, o que geralmente causa transtornos operacionais e complexidade das atividades.

Figura 2.2 - Detalhe do poste da linha 7, com rede aérea de tração, sinalização e 34,5 kV



Outro método de distribuição desses circuitos, e atualmente sendo usado nas obras de modernização da CPTM, é através de banco de dutos. Na região da extensão da linha 9 até a estação Varginha, será implantando uma nova subestação retificadora que será alimentada em 34,5 kV pela subestação primária Cidade Dutra, através de dutos enterrados.

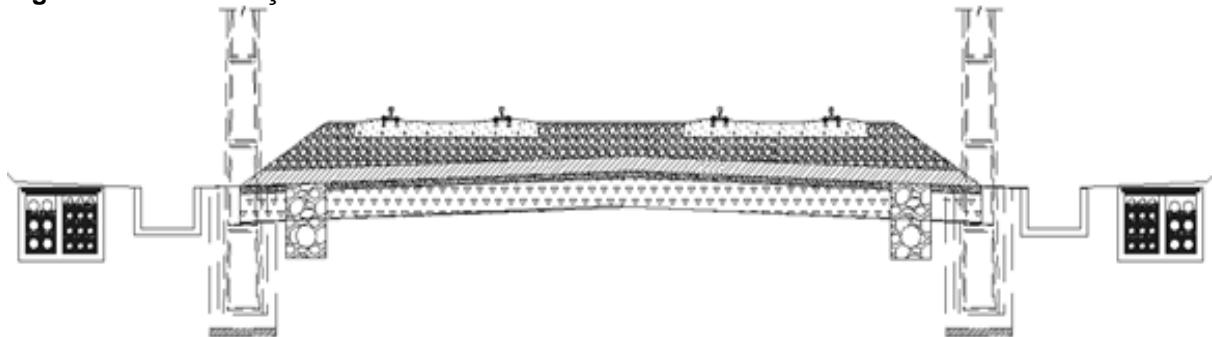
Figura 2.3 - Seção tipo do banco de dutos da extensão da Linha 9



Fonte: Documentos técnicos CPTM

Esses dutos preveem, além do encaminhamento do circuito de alimentação das subestações retificadoras, eletrodutos para os sistemas de sinalização, telecomunicação e fibra óptica. Conforme mostrado na Figura 2.4, assim como na distribuição aérea, são circuitos redundantes e independentes, que margeiam o trecho ferroviário.

Figura 2.4 - Distribuição dos bancos de dutos



Fonte: Documentos técnicos CPTM

Esses dois métodos de distribuição serão estudados neste trabalho, com a diferença que na distribuição aérea serão considerados postes independentes dos da rede aérea de tração atual, não só pela vantagem operacional, mas também porque isto requereria um estudo dos postes existentes e suas fundações, para comprovar que suportariam a carga extra. Essa atividade, além de sua complexidade, geraria um custo excedente para o projeto.

2.3. CONTRATOS DE FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

Conforme mostrado na Tabela 2.1, a CPTM possui 39 de suas estações de passageiros com fornecimento de energia elétrica na modalidade B, que engloba contratos de baixa tensão (tensão inferior a 2,3 kV), e o restante na modalidade A4, para tensões entre 2,3 kV e 44 kV. Essas modalidades de fornecimento de energia elétrica, além de possuírem uma carga tarifária mais elevada quando comparado com contratos de fornecimento em A2, também apresentam uma menor confiabilidade.

Para exemplificar tal afirmação, foi levantado a quantidade de falhas no fornecimento de energia para as estações nos anos de 2014 e 2015, e quantificamos o tempo total sem energia que estas falhas causaram.

Tabela 2.3 - Demonstrativo de falhas de fornecimento de energia nas estações

Linha	Falhas em 2014		Falhas em 2015	
	Quantidade	Horas	Quantidade	Horas
7	113	402,40	155	637,27
8	66	199,47	107	415,48
9	90	364,90	106	415,87
10	97	261,57	171	283,57
11	59	99,03	16	48,42
12	50	134,20	20	66,35
TOTAL	475	1461,57	475	1866,96

Os dados da Tabela 2.3 revelam a significância dessas falhas para o sistema da CPTM. E esses períodos não geram apenas transtornos operacionais, como também perda na arrecadação, pois das 92 atuais estações da companhia, apenas 60 possuem algum método de alimentação contingencial, como grupo geradores ou um banco de baterias. Portanto, nesses períodos sem energia, durando o horário comercial, o acesso ao sistema é feito de forma gratuita.

Por outro lado, a modalidade de fornecimento em A2 apresentou consideravelmente menos falhas. No ano de 2014 ocorreram apenas 2 falhas e no de 2015 foram 4 falhas, porém seu tempo indisponível não somou 3 horas.

2.4. CONTRATAÇÃO DE OBRAS E SERVIÇOS NA CPTM

Por ser a CPTM uma sociedade de economia mista, sofrendo participação dos setores públicos e privados, toda e qualquer compra, obras ou serviços devem ser contratados por licitações públicas, conforme o artigo 37 da Constituição Federal do Brasil, datada de 1988. A Lei 8.666, de 1993, regulamenta as normas para licitações e contratos da administração pública, em suas várias modalidades.

Para obras e serviços de engenharia com valores acima de R\$ 1.500.000,00, é utilizado o método de licitação chamado de concorrência. Em uma concorrência, todos os interessados podem participar, desde que atendam aos requisitos apresentados no edital da licitação. O vencedor da concorrência pode ser escolhido

por critérios de menor preço, melhor técnica, ou mais comumente por uma combinação dos dois.

Portanto, para um estudo financeiro coerente e fiel à realidade de contratações em uma empresa pública, é preciso levar em consideração que os custos das obras ou serviços irão depender da proposta apresentada pela empresa vencedora da concorrência, que poderão variar entre si, na busca da conquista da licitação.

Com isso, para o levantamento econômico deste estudo foram utilizados preços presentes em contratos atuais da companhia, que possuem os mesmos serviços e materiais necessários para a implantação deste projeto. Quando necessário, esses valores foram reajustados para os índices do ano de 2015, e para a utilização destes valores foi feito uma média entre os contratos que possuíam os mesmos itens.

3. DESENVOLVIMENTO

A fim de prover uma solução viável e eficiente para melhorar a autonomia e confiabilidade do fornecimento energético das estações e demais construções da CPTM, e se aproveitando das instalações fixas presentes, será analisado neste trabalho a interligação física dos sistemas de energia da CPTM em um nível de distribuição de 34,5 kV.

3.1. DEMANDA E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DA CPTM

O passo inicial dessa análise é determinar o atual carregamento das subestações primárias da companhia, para ser possível avaliar se as mesmas possuem capacidade de suprir as cargas extras a serem inseridas em seu sistema. Em Bianchin (2016) foi realizado um levantamento intensivo das demandas energéticas das estações, oficinas e prédios da CPTM, considerando não só as edificações atuais, mas também aquelas com projetos de modernização em andamento. Esses valores de demanda serão utilizados para dimensionar os circuitos de distribuição, e seus valores estão apresentados no ANEXO A.

Outro estudo, também feito em Bianchin (2016), é sobre o consumo destas estações. Esse estudo relaciona, para os anos de 2014 e 2015, o valor de economia que seria possível se as estações e prédios da CPTM tivessem sido alimentadas na modalidade A2, em mercado livre, durante esses períodos.

Tabela 3.1 - Economia prevista para fornecimento em A2, no mercado livre

Linha	Economia em 2014	Economia em 2015
7	R\$ 1.143.165,17	R\$ 1.650.738,50
8	R\$ 893.043,45	R\$ 1.747.604,63
9	R\$ 865.799,74	R\$ 1.454.685,15
10	R\$ 1.076.818,81	R\$ 1.670.276,21
11	R\$ 921.227,19	R\$ 1.462.313,13
12	R\$ 779.968,83	R\$ 1.341.224,76
Total	R\$ 5.680.023,19	R\$ 9.326.842,38

O mercado livre de energia é um ambiente onde consumidores e fornecedores podem negociar a energia elétrica livremente entre si, deferente do mercado cativo

onde o consumidor só é permitido comprar energia da concessionária detentora do direito de distribuição em sua área de atuação. A CPTM já possui o grande maioria de seus contratos de energia em mercado livre, principalmente devido a possibilidade de customização do fornecimento e de custos mais competitivos.

3.2. ESTUDO TÉCNICO DA INTERLIGAÇÃO EM 34,5 KV

Para esse estudo, com exceção das linhas 7 e 10, que já possuem uma linha de distribuição instalada, todas as outras linhas foram consideradas segregadas. As estações que são atingidas por mais de uma linha da CPTM serão alimentadas apenas por uma das linhas.

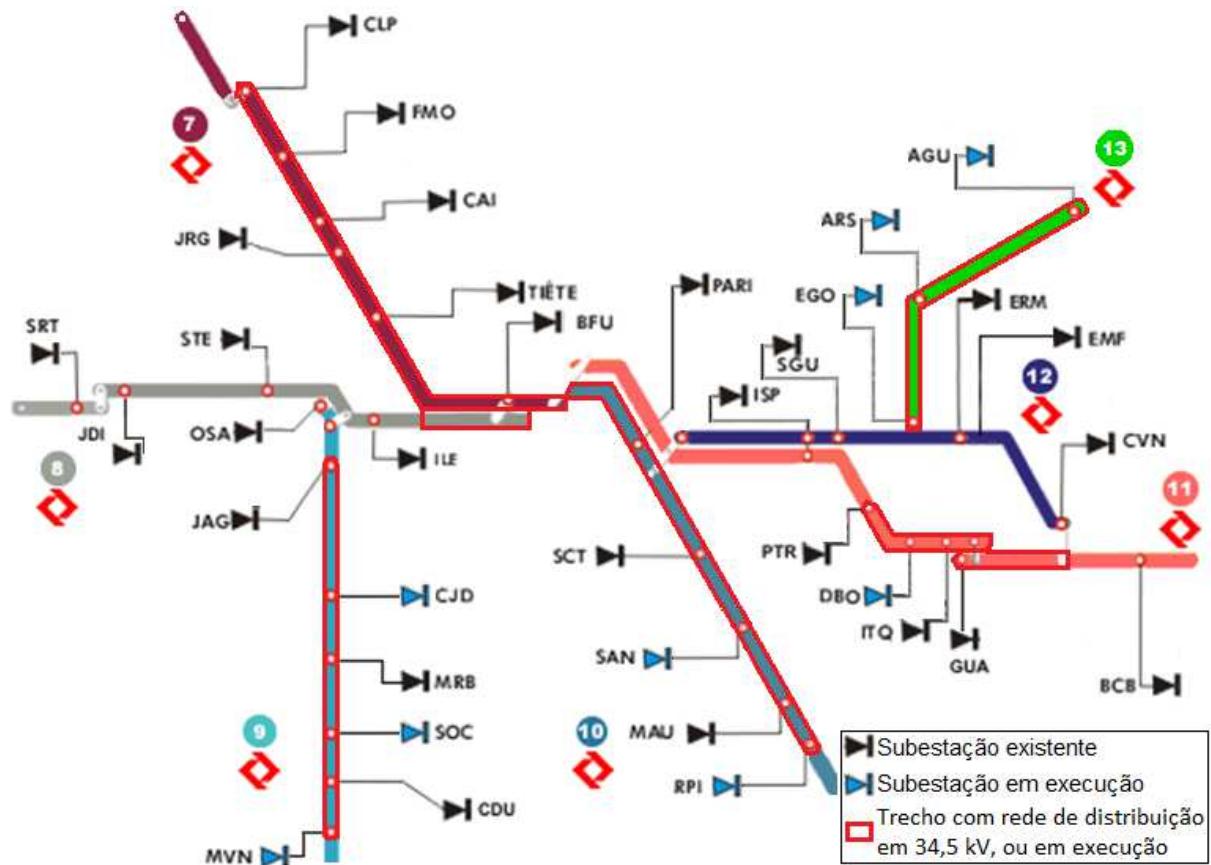
Algumas linhas CPTM, em certos trechos, seguem por vias paralelas, como é o caso do trecho entre as estações Julio Prestes e Lapa, linha 8, que tem seu traçado paralelo com a linha 7, e por consequência, com o seu circuito de distribuição em 34,5 kV. A critério de otimização do sistema proposto, estas estações serão consideradas alimentadas pelo sistema de distribuição das linhas 7 e 10, e o circuito em 34,5 kV da linha 8 iniciará na estação Domingos de Moraes. Devido ao ramal de distribuição que alimenta a subestação de Engenheiro São Paulo, também foram incluídos no circuito 7/10 a estação Brás e a subestação e oficina de Engenheiro São Paulo.

Tabela 3.2 - Configuração dos circuitos de interligação em 34,5 kV

Linha	Extremo Inicial	Extremo Final	Incluso nestes circuitos
7 e 10	Estação Jundiaí	Estação Rio Grande da Serra	Estações Julio Prestes, Lapa 8 e Brás e Oficinas Lapa, Luz e Eng. São Paulo
8	Estação Domingos de Moraes	Estação Amador Bueno	Estações Pres. Altino e Osasco, Pátio Bolívia, Oficina e Prédio Adm. De Altino
9	Estação Ceasa	Estação Varginha	
11	Estação Dom Bosco	Estação Estudantes	Estação Calmon Viana
12	Estação USP Leste	Estação Aracaré	
13	Estação Eng. Goulart	Sub. Aeroporto-Guarulhos	Estação Eng. Goulart

Dos trechos propostos na Tabela 3.2 para essa interligação, uma grande parcela dela já apresenta circuitos de distribuição em 34,5 kV, ou conforme implantação prevista ou em execução. Esses trechos como rede de distribuição estão apresentados na Figura 3.1 a seguir.

Figura 3.1 - Trechos com rede de distribuição de 34,5 kV, ou em execução



Uma observação importante a ser feita é que as estações Palmeiras-Barra Funda, da linha 8, Corinthians-Itaquera, da linha 11, e Tatuapé, da linha 12, possuem alimentação sob responsabilidade do Metrô de São Paulo, e não serão interligadas no sistema idealizado neste estudo. E pelo fato da estação Brás estar unida ao circuito das linhas 7 e 10, o circuito da linha 11 só será necessário a partir da subestação de Patriarca, e o da linha 12 se iniciará na estação USP Leste, considerando a estação Engenheiro Goulart como parte do circuito da linha 13. Com todo o exposto, os trechos que necessitam da implantação de uma rede de distribuição em 34,5 kV são:

Tabela 3.3 - Trecho restante para execução de rede de distribuição em 34,5 kV

Linha	Local Inicial	km	Local Final	km	TOTAL
7	Subestação Campo Limpo	49+633	Estação Jundiaí	60+492	10+859
8	Estação Domingos de Moraes	09+510	Estação Amador Bueno	42+339	32+829
9	Estação Ceasa	13+340	Subestação Jaguaré	14+800	01+460
	Subestação Mendes	43+350	Estação Varginha	45+820	02+470
10	Subestação Ribeirão Pires	33+100	Estação Rio Gde da Serra	36+677	03+577
11	Subestação Calmon Viana	33+931	Estação Estudantes	50+641	16+710
12	Estação USP Leste	18+068	Estação Aracaré	37+984	19+916
13	Estação Eng. Goulart	15+500	Subestação Eng. Goulart	15+720	00+220
					88+041

Para as linhas 8 e 12, que não possuem subestações retificadoras e circuitos de distribuição interna, foram selecionadas as subestações Osasco e Santa Rita, da linha 8, e Ermelino Matarazzo e Manoel Feio, da linha 12, que receberam transformadores de 25 MVA 88kV/34,5 kV, sendo responsáveis pela alimentação dos seus circuitos. A escolha de pelo menos duas subestações por linha se justifica pela melhor distribuição dos pontos de entrada, diminuindo perdas nas linhas de distribuição, e também em situações de contingência ou emergenciais, onde a outra subestação supriria a energia total da linha, através de seus circuitos redundantes.

3.2.1. Validação dos Circuitos de Distribuição em 34,5 kV

Com as divisões dos circuitos conforme planejado, é necessário uma validação da capacidade do sistema atual da CPTM de suprir as cargas extras demandadas. Essa validação foi feita através de simulações utilizando o *software EWB (Electronic Workbench)*, na busca também de ajustes que possam ser feitos para melhoria dos circuitos projetados. Sendo o objetivo dessas simulações apenas evidenciar que as subestações da empresa possuem potência instalada suficiente para suportar as novas cargas, e pela complexidade para se levantar certas variáveis para um cálculo completo, como dados dos transformadores e geometria e reatância dos cabos instalados, o sistema foi aproximado para o sistema foi aproximado para um circuito em corrente contínua, com um ângulo de carga igual a zero, considerando como

impedância dos cabos apenas sua resistência. Essas aproximações, apesar de causar uma inconsistência no cálculo na perda de potência na transmissão, sua escala de grandeza não interfere no propósito da simulação, como será observado a seguir neste trabalho.

Para a modelagem, o sistema foi simulado para considerar o pior cenário, onde todas as cargas demandam sua corrente máxima, e ter-se o valor de demanda máxima para as subestações primárias. No ambiente do *software* foi representado as subestações, as linhas de distribuição e as estações e prédios da companhia a serem alimentadas. As estações foram modeladas como cargas, sendo P_e as suas demanda a contratar, resumidas no ANEXO A, a sua corrente elétrica consumida I_e é dada pela fórmula 3.1:

$$I_e = \frac{P_e}{U_{vazio}} \quad 3.1$$

A modelagem dos cabos é feita para considerar a perda de potência na distribuição, através de sua resistência à passagem da corrente elétrica. A fórmula 3.2 (PIRES,2006) representa esse cálculo, considerando a área S_{cu} como a somatória das áreas dos cabos que compõem o circuito trifásica, sendo ρ_{cu} a resistividade de cabos de cobre por quilômetro a 40 °C, no valor de 0,01888 Ω.mm²/m:

$$R_{cb} = \frac{\rho_{cu} \cdot 10^3}{S_{cu}} = \frac{18,8}{S_{cu}} \quad 3.2$$

Por fim, a modelagem das subestações utiliza sua corrente a vazio I_{SE} , sua resistência interna R_{SE} e tensão vazio U_{vazio} . A tensão a vazio pode ser calculada pela expressão 3.3 (PIRES,2006) abaixo:

$$reg = 100 \frac{U_{vazio} - U_{SE}}{U_{SE}} \quad 3.3$$

De acordo com BIRD (2009), os valores típicos de regulação, para transformadores de grande porte, gira em torno de 1%, valor considerado neste estudo. Em posse do valor da regulação, a potência em carga máxima P_{SE} do transformador, e a tensão do seu secundário U_{SE} , a sua resistência interna é dada por:

$$R_{SE} = \frac{reg}{100} \cdot \frac{U_{SE}^2}{P_{SE}} \quad 3.4$$

E por fim, o valor da corrente a vazio do transformador é calculada pela fórmula 3.5:

$$I_{SE} = \frac{U_{vazio}}{R_{SE}} \quad 3.5$$

Com a soma desses dados, foi realizado simulações dos circuitos projetados, que estão apresentados APÊNDICE A. Os resultados importantes para a comprovação da viabilidade são a corrente elétrica que irá circular pelos circuitos de distribuição, para confirmar se os cabos utilizados são suficientes, e as demandas extras encontradas para cada subestação, representados na Tabela 3.4 a seguir, junto com as demandas atuais das subestações que já trabalham em 34,5 kV.

Tabela 3.4 - Demandas para as subestações do sistema de 34,5 kV

Subestação Primária	Linha	Potência Total [MVA]	Demanda Máxima [MW]		
			Atual	Extra	Total
Tietê	7	30	11,117	1,055	12,172
Francisco Morato	7	40	10,346	1,181	11,527
Pari	10	40	15,552	2,921	18,473
São Caetano	10	30	15,437	0,929	16,366
Osasco	8	25	-	1,993	1,993
Santa Rita	8	25	-	0,729	0,729
Jaguaré	9	50	8,500	0,431	8,931
Cidade Dutra	9	50	15,674	0,691	16,364
Patriarca	11	50	9,008	0,336	9,344
Calmon Viana	11	27	7,121	1,204	8,325
Comendador Ermelino	12	25	-	0,259	0,259
Manoel Feio	12	25	-	0,426	0,426
Ayrton Senna	13	50	4,564	0,431	4,995

A Tabela 3.4 mostra os valores de demanda atual para alimentação dos sistemas em 34,5 kV da CPTM, e valores extras a serem inseridos com este estudo, onde sua somatória ainda é consideravelmente inferior à potência máxima dos transformadores instalados. Com esses dados também é possível comprovar os resultados da simulação quando comparada com os valores de demanda líquida apresentados no APÊNDICE A, sendo a diferença a perda de potência nas linhas de

distribuição. Comprovada tecnicamente a aplicação deste estudo, o passo seguinte é analisar economicamente sua viabilidade.

Tabela 3.5 - Comparativo entre Demanda líquida e Demanda simulada

Circuitos	Demanda líquida (MW)	Demandasimulada (MW)
7/10	6,060	6,086
8	2,697	2,722
9	1,115	1,122
11	1,515	1,540
12	0,678	0,685
13	0,427	0,431

3.3. ESTUDO FINANCEIRO DA INTERLIGAÇÃO EM 34,5 KV

Este projeto prevê intervenções em subestações primárias da companhia, em suas de distribuição com sua infraestrutura, e também nas cabines primárias de alimentação de suas estações, oficinas e prédios. Este Estudo financeiro se faz possível através de valores e itens presentes em contratos em andamento dentro da CPTM, adotando seus custos como os necessários para esta implantação.

A análise econômica das linhas de distribuição requer um comparativo de custos entre os modelos apresentados. Para a distribuição aérea, foi utilizado espaçamento entre os postes de 80 m, vário considerado normal para essa aplicação, conforme NBR 15688-2009: Redes de Distribuição Aérea de Energia Elétrica com cobres nus. A Tabela 3.6 resume os valores de suas principais intervenções, materiais e serviços, para os trechos restantes da CPTM onde ainda não possuem uma linha de distribuição operacional ou planejada.

Tabela 3.6 - Comparativo de custo dos modelos de distribuição

Linha	Trecho de implantação [km]	Modelo de Distribuição	
		Aérea	Enterrada
7	10,859	R\$ 3.881.001,95	R\$ 34.945.565,08
8	32,829	R\$ 11.730.707,71	R\$ 105.647.661,48
9	3,930	R\$ 1.416.387,53	R\$ 12.647.211,60
10	3,577	R\$ 1.281.461,38	R\$ 11.511.215,24
11	16,710	R\$ 5.967.924,41	R\$ 53.774.785,20
12	19,916	R\$ 7.111.438,97	R\$ 64.092.077,92
13	0,220	R\$ 82.331,78	R\$ 707.986,40
TOTAL	88,041	R\$ 31.471.253,72	R\$ 283.326.502,92

Fica evidente a diferença entre os dois investimentos. Isso é facilmente explicado pela maior intervenção necessária para um sistema de dutos enterrados, o custo elevado do cabo isolado em relação ao cabo de cobre nu aplicado em redes aéreas, além da praticidade e funcionalidade com ele obtida, permitindo também a passagem de circuitos sinalização e comunicação, como também cabeamentos de terceiros, conforme desejo da empresa. Portanto, o estudo dos dois métodos se mantém válido, e a preferência da companhia por qual método decidir dependerá dos interesses dos seus interesses.

O estudo financeiro só é completo quando se é quantificado as intervenções necessárias nas subestações primárias e nas estações e prédios da CPTM. Das subestações solicitadas para essa nova demanda, apenas as de Osasco, Santa Rita, Comendador Ermelino e Manoel Feio não estão preparadas para tal. Para essas subestações será previsto, além de reforma civil e equipamentos auxiliares, um transformador 88kV/34,5kV de 25 MVA, menor valor comercial. Todos os novos pontos de carga necessitarão de adaptação no seu padrão de entrada para a sua alimentação ser realizada em 34,5 kV. Foi previsto neste projeto a instalação de cabines primárias com transformadores para 34,5 kV/220 V de 500 kVA e 750 kVA, padrões adotados pela CPTM, junto com seus equipamentos e quadros de proteção.

Com o estudo financeiro realizado o valor total a ser dispendido para a implantação da integralização dos sistemas elétricos da CPTM em 34,5 kV é:

Tabela 3.7 - Custo Total da Integralização em 34,5 kV

Atividade	Qtde	Custo Total	
		Aérea	Enterrada
Rede de Distribuição	88,041 km	R\$ 31.471.253,72	R\$ 283.326.502,92
Subestações Primárias em 34,5 kV	4 un		R\$ 17.139.623,97
Cabines Primárias das Estações em 34,5 kV	102 un		R\$ 86.700.000,00
		R\$ 135.310.877,69	R\$ 387.166.126,89

3.3.1. Previsão de Retorno dos Investimentos

Com o apresentado na Tabela 3.7, observa-se que o modelo de distribuição por dutos enterrados se mostrou muito mais oneroso, resultado já esperado. Sua aplicação é economicamente mais viável em ocasiões onde a

distribuição aérea encontra grandes interferências, como na região de estações, viadutos e passarelas.

Porém, para conclusão comparativa entre o tempo de retorno destes investimentos, e expandindo para os próximos anos os valores de economia para ano de 2015 ao se utilizar apenas contratos de energia em A2, valor mostrado na Tabela 3.1, obtém-se de forma simples os seguintes resultados:

Tabela 3.8 - Previsão de retorno dos investimentos

Modelo de Integralização	Investimento	Economia Anual	Previsão de retorno [anos]
34,5 kV - Distribuição aérea	R\$ 135.310.877,69	R\$ 9.326.842,38	14,5
34,5 kV - Distribuição enterrada	R\$ 387.166.126,89	R\$ 9.326.842,38	41,5

CONCLUSÃO

Com esse trabalho de conclusão de curso foi buscado fundamentações técnicas e financeiras de uma possível interligação dos sistemas de alimentação da CPTM. Buscou-se evidenciar a possibilidade desta interligação considerando as instalações fixas existentes em 34,5 kV, como proposta de economia, menor tempo e quantidade nas intervenções.

O levantamento existente das demandas de consumo de energia das estações, prédios e oficinas da CPTM foi ferramenta importante para este estudo, pois foi fonte de informação para a quantificação da potência extra que o sistema atual deveria prover, além de permitir uma previsão de retorno dos investimentos propostos.

Com as premissas utilizadas, estas tiradas de conhecimentos e experiências anteriores, chegou-se a sistemas de interligação com um grau satisfatório de otimização, o que foi buscado e comprovado através das simulações realizadas, considerando diferentes cenários até encontrar o mais relevante.

Por fim, este trabalho apresenta resultados e informações que podem orientar uma possível decisão técnica para a interligação dos sistemas de energia da empresa, através do comparativo de equipamentos, preferências operacionais, custos de sua implantação e número de intervenções.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15688**: Redes de distribuição aérea de energia elétrica com condutores nus. Rio de Janeiro , 2009.
- BIANCHIN, C. A. **Interligação do sistema de alimentação elétrica da CPTM: Demanda, consumo e contratação de energia elétrica**. 61 p. Monografia - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2016.
- BIRD, J. **Circuitos Elétricos**: teoria e tecnologia. 3^a. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**, Brasília: Senado, 1988.
- BRASIL, Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993. Regulamenta o art.37, inciso XXI, da Constituição Federal, institui normas para licitações e contratos da Administração Pública e dá outras providências. Brasília, 1993.
- GORNI, A. A. **A eletrificação nas ferrovias brasileiras**. São Vicente: [s.n.], 2009. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/Gorni_ElectroBras_2003.pdf>. Acesso em: Agosto 2014.
- PIRES, C. L. **Simulação do sistema de tração elétrica metro-ferroviária**. 424 p. Tese - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

APÊNDICE A – Circuitos EWB para simulação em 34,5 kV

Figura A.1 - Circuito para simulação das linhas 7 e 10

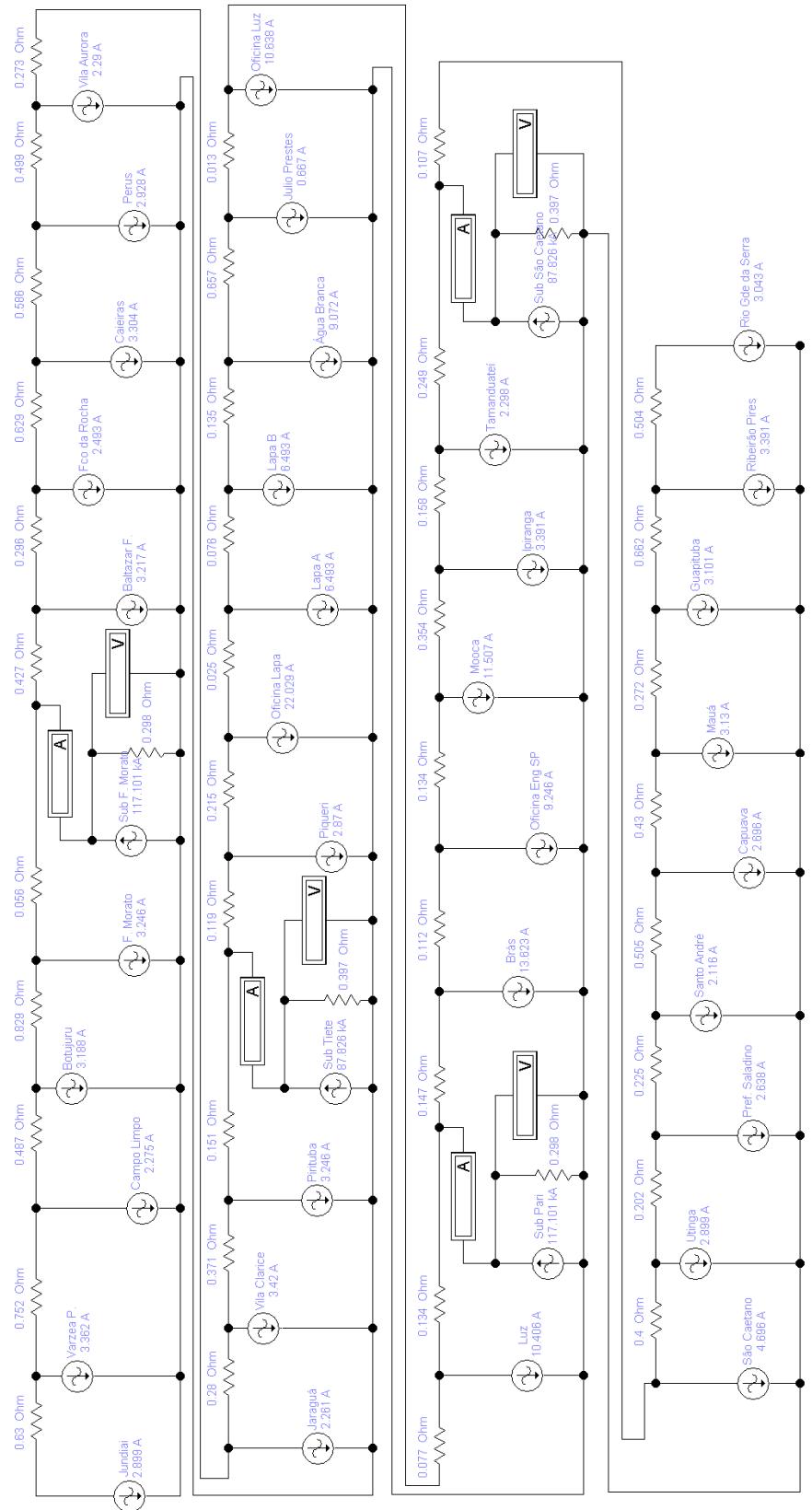


Figura A.2 - Circuito para simulação da linha 8

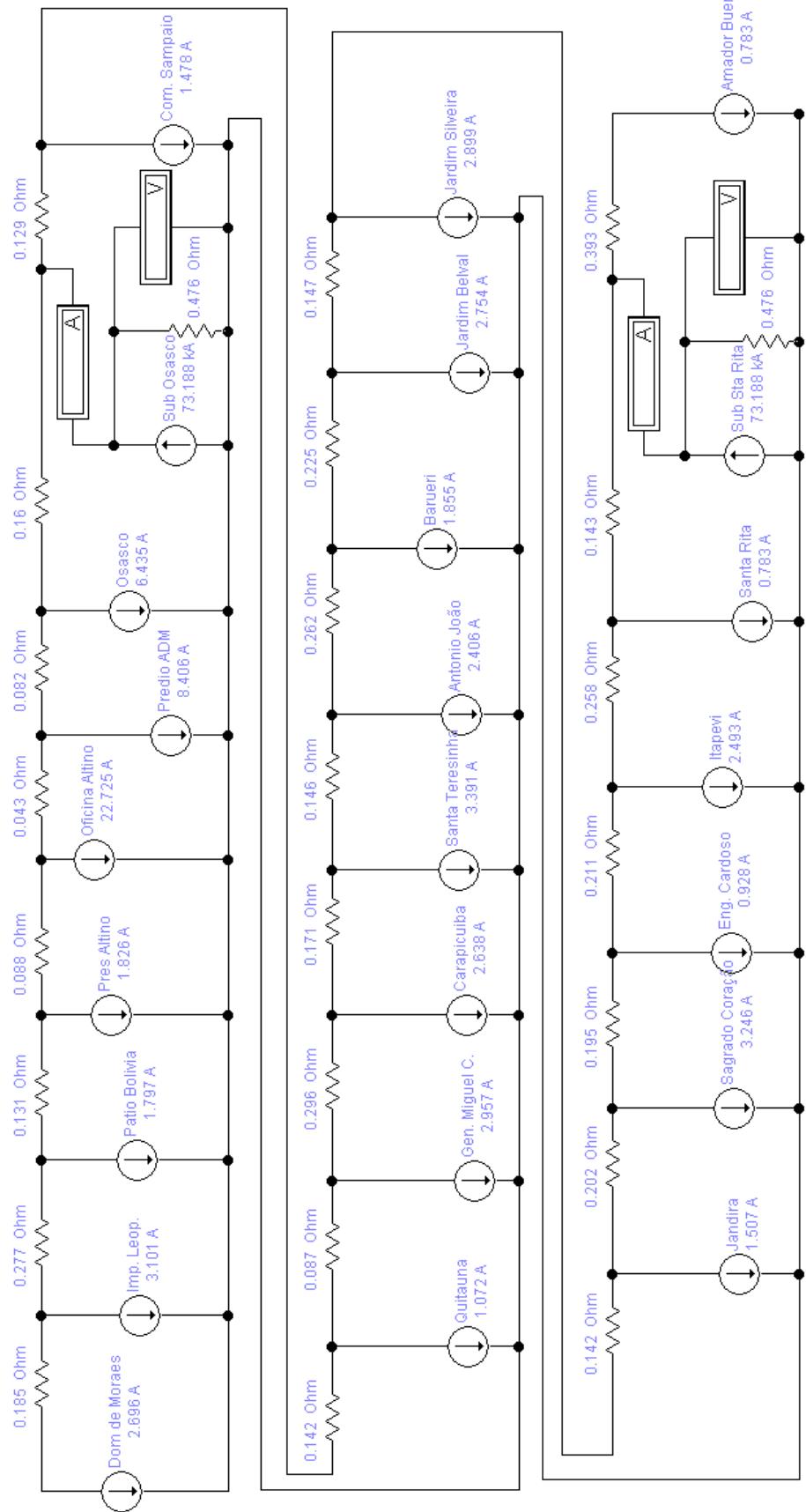


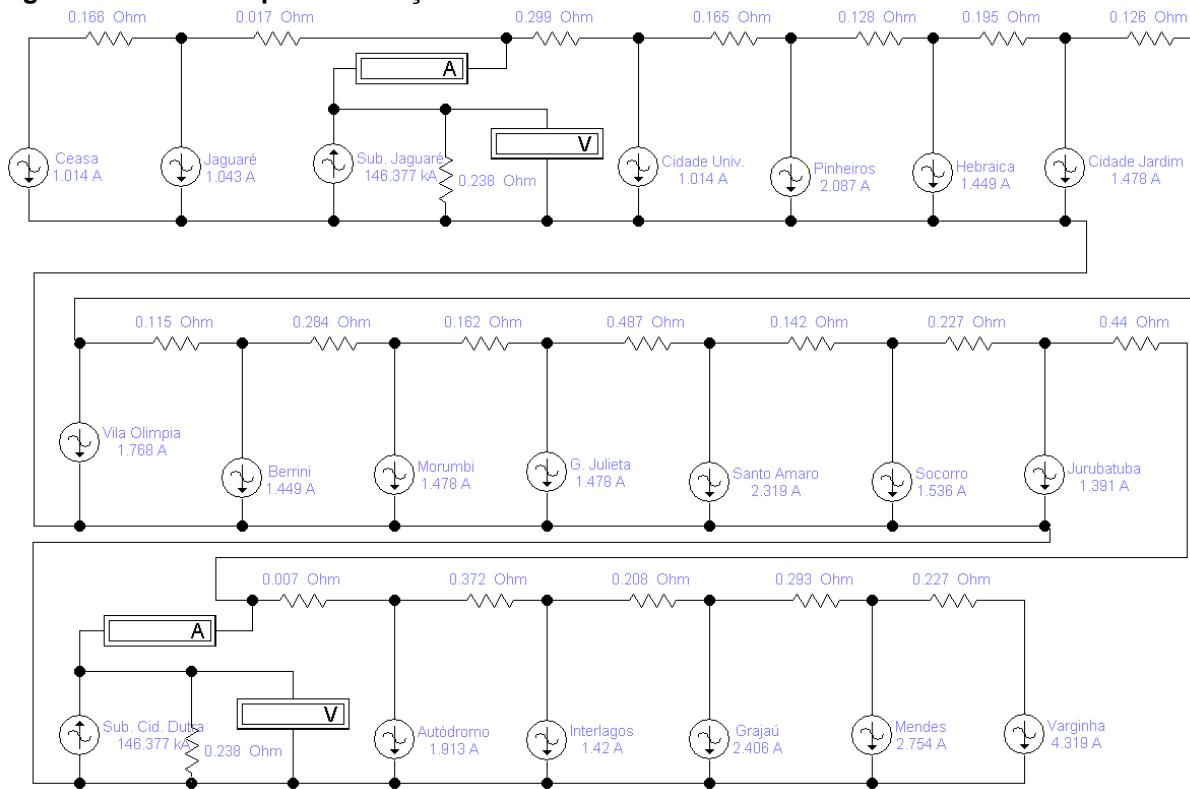
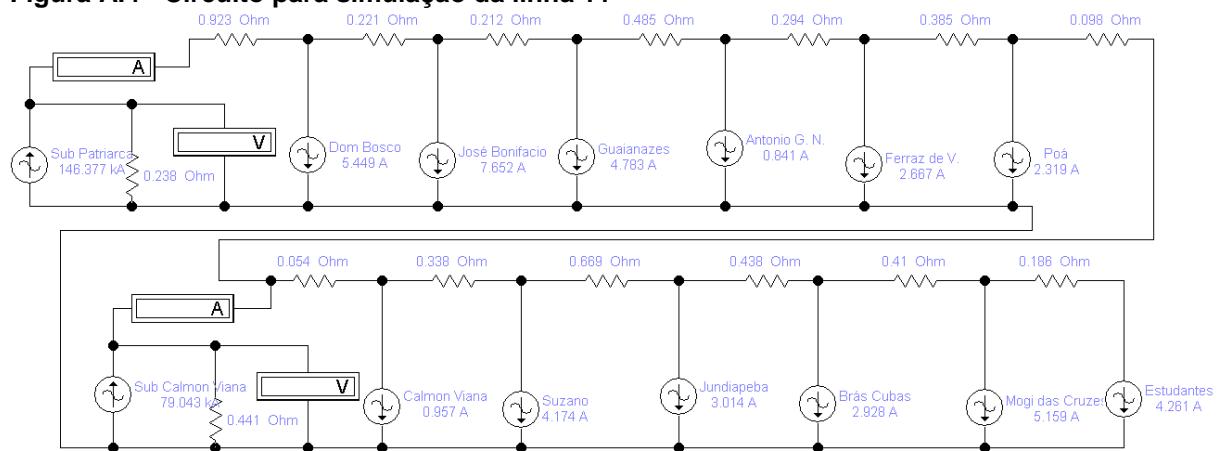
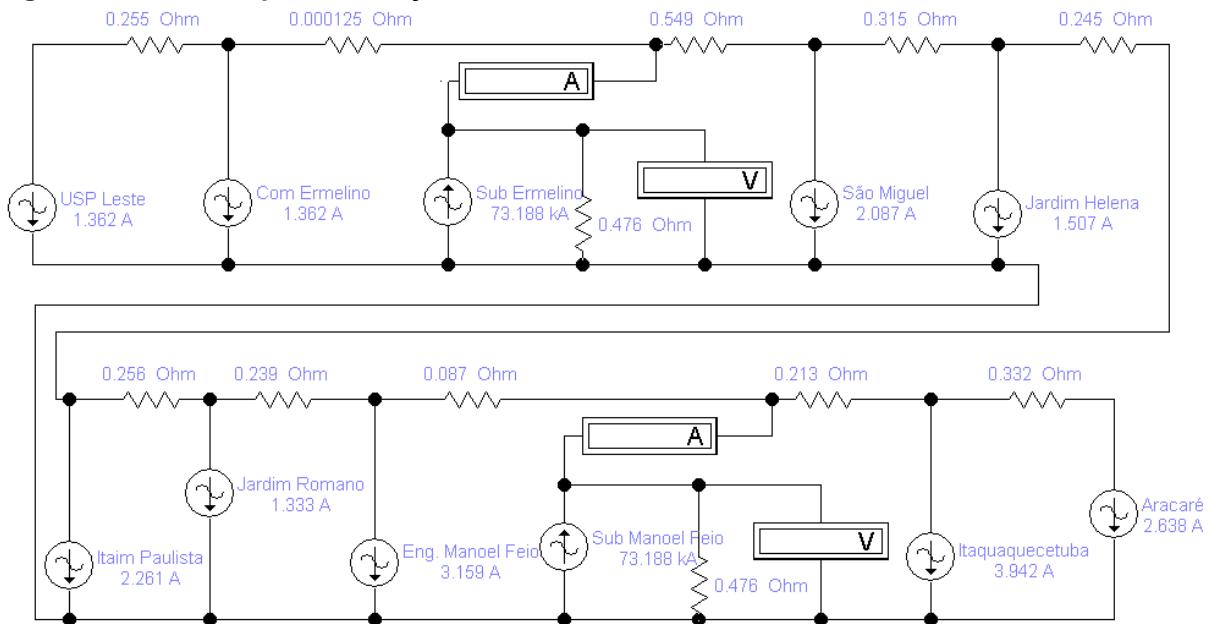
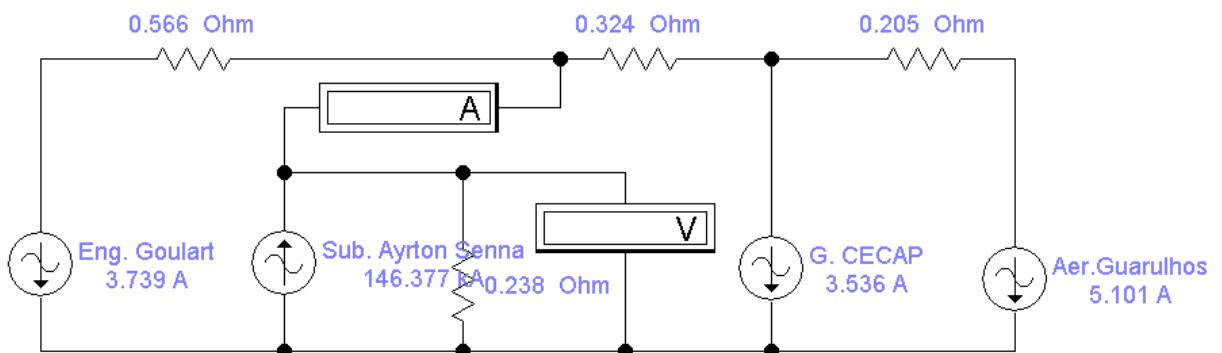
Figura A.3 - Circuito para simulação da linha 9**Figura A.4 - Circuito para simulação da linha 11**

Figura A.5 - Circuito para simulação da linha 12**Figura A.6 - Circuito para simulação da linha 13**

ANEXO A – Demanda líquida das estações

Quadro A.1 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda líquida para os empreendimentos da linha 7 - Rubi.

Estação/Outros	Potência Instalada (kW)	Demandas para a Entrada de Energia (kW)	Demandas líquidas (kW)
Água Branca	1.531,32	1.158,67	313,00
Lapa 07	1.112,59	827,86	224,00
Piqueri	529,07	367,13	99,00
Pirituba	580,15	415,66	112,00
Vila Clarice	651,08	472,82	118,00
Jaraguá	418,22	289,16	78,00
Vila Aurora	453,89	316,95	79,00
Perus	535,66	375,64	101,00
Caieiras	591,97	423,41	114,00
Franco da Rocha	510,89	285,62	86,00
Baltazar Fidélis	572,71	412,01	111,00
Francisco Morato	581,83	414,28	112,00
Botujuru	561,98	406,15	110,00
Campo Limpo Paulista	483,97	347,83	94,00
Várzea Paulista	644,08	463,61	116,00
Jundiaí	535,68	369,88	100,00
Oficinas da Luz	1.880,76	1.222,50	367,00
Oficinas da Lapa	3.898,08	2.533,75	760,00
TOTAL	16.073,94	11.102,92	3.094,00

Quadro A.2 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda líquida para os empreendimentos da linha 8 - Diamante.

Estação/Outros	Potência Instalada (kW)	Demandas para a Entrada de Energia (kW)	Demandas líquidas (kW)
Júlio Prestes	130,90	86,96	23,00
Barra Funda (Metrô-SP)	-	-	-
Lapa 08	1.112,59	827,86	224,00
Domingos de Moraes	373,49	237,21	93,00
Imperatriz Leopoldina	564,61	412,72	107,00
Comandante Sampaio	298,33	222,38	51,00
Quitaúna	189,31	138,47	37,00
General Miguel Costa	558,30	406,21	102,00
Carapicuíba	592,53	415,35	91,00
Santa Terezinha	648,90	469,61	117,00
Antônio João	463,61	309,16	83,00
Barueri	349,78	254,05	64,00
Jardim Belval	526,98	352,93	95,00
Jardim Silveira	549,79	370,80	100,00
Jandira	553,28	373,15	52,00
Sagrado Coração	595,50	415,83	112,00
Engenheiro Cardoso	492,06	320,54	32,00
Itapevi	502,16	392,52	86,00
Santa Rita	29,68	27,31	27,00
Amador Bueno	29,68	27,31	27,00
Oficinas de Presidente Altino	4.022,91	2.614,89	784,00
Pátio Bolívia	318,54	207,05	62,00
Prédio Adm. de Presidente Altino	1.487,03	966,57	290,00
TOTAL	14.389,96	9.848,87	2.659,00

Quadro A.3 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda líquida para os empreendimentos da linha 9 - Esmeralda.

Estação/Outros	Potência Instalada (kW)	Demandas para a Entrada de Energia (kW)	Demandas líquida (kW)
Osasco	1.021,52	740,53	222,00
Presidente Altino	388,16	286,73	63,00
Ceasa	317,79	230,80	35,00
Villa Lobos-Jaguaré	340,76	255,54	36,00
Cidade Universitária	304,88	230,58	35,00
Pinheiros	325,35	257,31	72,00
Hebraica Rebouças	344,94	250,18	50,00
Cidade Jardim	289,94	211,79	51,00
Vila Olímpia	385,46	263,08	61,00
Berrini	340,85	237,27	50,00
Morumbi	429,67	282,10	51,00
Granja Julieta	435,19	285,03	51,00
Santo Amaro	848,73	571,68	80,00
Socorro	396,36	281,58	53,00
Jurubatuba	344,82	281,60	48,00
Autódromo	450,83	301,28	66,00
Primavera-Interlagos	396,98	257,75	49,00
Grajaú	531,25	375,07	83,00
Mendes-Vila Natal	455,23	350,10	95,00
Varginha	708,45	552,43	149,00
TOTAL	9.057,14	6.502,42	1.400,00

Quadro A.4 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda líquida para os empreendimentos da linha 10 - Turquesa.

Estação/Outros	Potência Instalada (kW)	Demandas para a Entrada de Energia (kW)	Demandas líquida (kW)
Prédio da Luz	1.840,27	1.196,18	359,00
Mooca	2.036,06	1.323,44	397,00
Ipiranga	603,83	431,83	117,00
Tamanduateí	603,74	403,33	101,00
São Caetano	819,78	601,12	162,00
Utinga	521,89	370,43	100,00
Pref. Saladino	448,99	338,78	91,00
Prefeito Celso Daniel-Santo André	371,89	241,73	73,00
Capuava	470,49	345,23	93,00
Mauá	595,72	400,05	108,00
Guapituba	578,92	398,00	107,00
Ribeirão Pires	599,10	433,08	117,00
Rio Grande da Serra	523,13	388,09	105,00
TOTAL	10.013,80	6.871,28	1.930,00

Quadro A.5 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda líquida para os empreendimentos da linha 11 - Coral.

Estação/Outros	Potência Instalada (kW)	Demandas para a Entrada de Energia (kW)	Demandas líquida (kW)
Itaquera (Metrô-SP)	-	-	-
Dom Bosco	962,35	625,53	188,00
José Bonifácio	1.352,36	879,04	264,00
Guaianases	846,33	550,11	165,00
Antônio Gianetti Neto	482,47	318,19	29,00
Ferraz de Vasconcelos	667,50	457,72	82,00
Poá	441,17	320,38	80,00
Suzano	758,31	532,92	144,00
Jundiapeba	556,91	385,07	104,00
Brás Cubas	540,91	372,80	101,00
Mogi das Cruzes	933,97	658,10	178,00
Estudantes	815,86	545,01	147,00
Engenheiro São Paulo	1.634,13	1.062,18	319,00
TOTAL	9.992,26	6.707,04	1.801,00

Quadro A.6 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda líquida para os empreendimentos da linha 12 - Safira.

Estação/Outros	Potência Instalada (kW)	Demandas para a Entrada de Energia (kW)	Demandas líquida (kW)
Prédio do Brás	2.410,26	1.566,67	470,00
Tatuapé (Metrô-SP)	-	-	-
USP Leste	409,70	259,86	47,00
Comendador Ermelino	427,45	278,49	47,00
São Miguel Paulista	442,25	289,07	72,00
Jardim Helena-Vila Mara	409,70	260,48	52,00
Itaim Paulista	484,71	300,32	78,00
Jardim Romano	422,03	269,81	46,00
Engenheiro Manoel Feio	751,43	496,62	109,00
Itaquaquecetuba	687,08	502,32	136,00
Aracaré	462,23	338,46	91,00
Calmon Viana	175,10	122,92	33,00
TOTAL	7.081,94	4.685,00	1.181,00

Quadro A.7 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda líquida para os empreendimentos da linha 13 - Jade.

Estação/Outros	Potência Instalada (kW)	Demandas para a Entrada de Energia (kW)	Demandas líquida (kW)
Engenheiro Goulart	665,90	478,82	129,00
Guarulhos - CECAP	626,10	452,94	122,00
Aeroporto - Guarulhos	927,66	653,48	176,00
TOTAL	2.219,67	1.585,25	427,00