

**RAQUEL MEGUMI HASHIGUTI**

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

Distribuição em 13,8 kV

São Paulo

2016

**RAQUEL MEGUMI HASHIGUTI**

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

Distribuição em 13,8 kV

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

Orientador: Prof. Dr. Cassiano Lobo Pires

São Paulo

2016

**RAQUEL MEGUMI HASHIGUTI**

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

Distribuição em 13,8 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

#### Catálogo-na-publicação

Hashiguti, Raquel Megumi

Interligação física dos sistemas elétricos da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos: distribuição em 13,8 kV / R. M. Hashiguti -- São Paulo, 2016.  
36 p.

Monografia (Especialização em Tecnologia Metroferroviária) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. .

1.Ferrovia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. II.t.

## **RESUMO**

Partindo do modelo de linha de distribuição interna existente nas linhas 7 e 10 da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos, e tendo em vista o plano de modernização de suas estações, propõe-se neste trabalho, realizar um estudo técnico e financeiro para alimentar as estações através de linha interna de distribuição de energia em 13,8 kV, que será alimentada por subestações existentes, as quais serão necessárias algumas intervenções. A validação do sistema proposto será feita através de software de simulação e ao final são apresentadas estimativas de retorno do investimento.

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

## **ABSTRACT**

Starting from the existing internal distribution line model at the lines 7 and 10 of the Companhia Paulista de Trens Metropolitanos, and owing to the modernization his stations, it is proposed in this work, achieve a technical and financial study to feed the stations with internal line power distribution in 13.8 kV, which will be powered by existing substations, which some interventions will be needed . The validation of the proposed system will be performed by simulation software and at the end are presented estimates return on investment.

Keywords:. Railway. Substation. Distribution line. Station.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Serviço de migração de pórtico de sustentação dos sistemas de energia da CPTM .....	14
Figura 2.2 - Seção tipo do banco de dutos da extensão da Linha 9 – Esmeralda.....	15
Figura 2.3 - Distribuição típica do banco de dutos .....	15
Figura 3.1 - Configuração da alimentação das estações em 13,8 kV para as linhas 7 e 10. ....	21
Figura 3.2 - Configuração da alimentação das estações em 13,8 kV para as linhas 8 e 9. ....	22
Figura 3.3 - Configuração da alimentação das estações em 13,8 kV para as linhas 11, 12 e 13. ....	23
Figura 3.4 - Circuito Linhas 7 e 10, em 13,8 kV .....	29
Figura 3.5 - Circuito Linhas 8 e 9, em 13,8 kV .....	30
Figura 3.6 - Circuito Linhas 11, 12 e 13, em 13,8 kV .....	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resumo dos padrões de entrada em média e baixa tensão. ....	13
Tabela 2.2 - Total de falhas e do tempo em falta em subestações - 2014 e 2015 ....	15
Tabela 2.3 - Total de falhas e do tempo em falta em estações - 2014.....	16
Tabela 2.4 - Total de falhas e do tempo em falta em estações - 2015.....	16
Tabela 3.1 - Resumo de acréscimo de demanda nas linhas da CPTM.....	18
Tabela 3.2 - Estimativa de economia com valores baseados em 2014 e 2015.....	19
Tabela 3.3 - Demanda máxima para as subestações primárias na distribuição em 13,8 kV .....	23
Tabela 3.4 - Demonstrativo dos trechos para implantação da rede de distribuição em 13,8 kV .....	24
Tabela 3.5 - Comparativo entre os custos dos modelos de distribuição em 13,8 kV	25
Tabela 3.6 - Custo total da integralização em 13,8 kV .....	26
Tabela 3.7 - Previsão de retorno dos investimentos .....	26



## LISTA DE QUADROS

Quadro A.1 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda Líquida para os empreendimentos da linha 07 - Rubi. ....	32
Quadro A.2 -Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda Líquida para os empreendimentos da linha 08 - Diamante. ....	33
Quadro A.3 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda Líquida para os empreendimentos da linha 09 - Esmeralda. ....	34
Quadro A.4 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda Líquida para os empreendimentos da linha 10 - Turquesa. ....	35
Quadro A.5 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda Líquida para os empreendimentos da linha 11 - Coral.....	35
Quadro A.6 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda Líquida para os empreendimentos da linha 12 - Safira. ....	36
Quadro A.7 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda Líquida para os empreendimentos da linha 13 - Jade.....	36

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CBTU – Companhia Brasileira de Trens Urbanos

CPTM – Companhia Paulista de Trens Metropolitanos

EFCB – Estrada de Ferro Central do Brasil

EWB – Electronic Workbench

FEPASA – Ferrovia Paulista S/A

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

SE – Subestação

STU/SP – Superintendência de Trens Urbanos de São Paulo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho_{cu}$  – Resistividade do cobre  
A – Ampere (unidade corrente elétrica)  
m – Metro (unidade de comprimento)  
 $I_e$  – Corrente elétrica consumida  
 $I_0$  – Corrente elétrica à vazio da subestação  
 $P_L$  – Potência demandada pelas estações  
reg – Regulação  
 $R_{cb}$  – Resistência do cabeamento  
 $R_L$  – Resistência interna da subestação  
 $S_{cu}$  – Área de cobre  
 $U_0$  – Tensão à vazio  
 $U_L$  – 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

	<b>RESUMO.....</b>	<b>3</b>
	<b>ABSTRACT.....</b>	<b>4</b>
	<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>5</b>
	<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>6</b>
	<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>7</b>
	<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>8</b>
	<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>9</b>
<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.</b>	<b>ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>12</b>
2.1.	SISTEMAS DE ENERGIA DA CPTM .....	12
2.2.	LINHA DE DISTRIBUIÇÃO INTERNA.....	13
2.3.	PROBLEMAS COM FORNECIMENTO DE ENERGIA.....	15
2.4.	CONTRATAÇÃO NO SETOR PÚBLICO.....	17
<b>3.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>18</b>
3.1.	ESTUDO DE DEMANDA E CONSUMO.....	18
3.2.	ESTUDO TÉCNICO/FINANCEIRO DA INTERLIGAÇÃO .....	19
3.2.1.	<b>Modelagem do circuito.....</b>	<b>20</b>
3.2.2.	<b>Estudo técnico de interligação em 13,8 kV .....</b>	<b>21</b>
3.2.3.	<b>Previsão de retorno dos investimentos.....</b>	<b>26</b>
	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>27</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>28</b>
	<b>APÊNDICE A - Circuitos EWB para simulação em 13,8 kV .....</b>	<b>29</b>
	<b>ANEXO A - Demanda exigida por cada estação .....</b>	<b>32</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Pensando em aumentar a autonomia das estações de passageiros da CPTM e ainda favorecer-se de tarifas mais econômicas, decidiu-se neste trabalho, analisar a viabilidade técnica e econômica da alimentação das estações através de uma linha de distribuição interna proveniente de subestações existentes.

Tendo em vista o plano de modernização das estações, que inclui a padronização do nível de tensão de entrada em 13,8 kV, aqui serão apresentados propostas de linhas de distribuição tanto aéreo quanto por banco de dutos para a alimentação desse sistema, bem como todas intervenções necessárias à sua implantação.

O estudo aqui proposto foi montado a partir de dados inicialmente levantados no trabalho Interligação física dos sistemas elétricos da CPTM: demanda, consumo e contratação de energia elétrica, de Bianchin. Em posse desses dados, são determinadas as potências demandadas por cada estação.

Conhecendo as localizações das localidades consumidoras e das possíveis alimentadoras propôs-se um circuito no qual há a necessidade de verificar a sua viabilidade técnica, que aqui será feita através de *software* de simulação. Pretende-se ainda apresentar a previsão de retorno dos investimentos propostos.

## **2. ESTADO DA ARTE**

### **2.1. SISTEMAS DE ENERGIA DA CPTM**

Formada a partir dos sistemas de transporte de passageiros, sobre trilhos, operados em São Paulo pela Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU) e pela Ferrovia Paulista S/A (FEPASA) a Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) foi criada no dia 28 de maio de 1992 pela Lei Estadual nº 7.861, e é uma empresa de economia mista do Governo do Estado de São Paulo, ligada à Secretaria dos Transportes Metropolitanos (CPTM, 2014).

A CPTM conta atualmente com seis linhas, que somam 257,5 km operacionais, nas quais estão distribuídas 20 subestações primárias, 5 subestações retificadoras, 92 estações de passageiros e 5 outras dependências (pátios, oficinas e prédios administrativos). E ainda no seu plano de modernização, estão a extensão da linha 9 (com 4,5 km, duas estações de passageiros e uma subestação retificadora), a implantação da linha 13 (com 12,2 km de extensão, 2 novas estações de passageiros, uma subestação primária e outras duas retificadoras) e ainda mais 4 subestações retificadoras distribuídas pelas linhas 9, 10 e 11.

A concessionária local de energia elétrica alimenta a subestação primária da CPTM, que resumidamente, rebaixa essa tensão para 1250 V, retifica essa tensão para 3000 V corrente contínua e alimenta a rede aérea de tração. Em alguns casos ainda rebaixa a tensão proveniente da concessionária para 34,5 kV e alimenta as subestações retificadoras, através de uma linha de distribuição interna.

Essa linha de distribuição interna em 34,5 kV é o sistema herdado da Estrada de Ferro Santos Jundiaí (EFSJ), atuais linhas 7 e 10, que a partir de 2008, a CPTM passou a adotá-lo em contratações de outras linhas.

Já as estações são alimentadas pela concessionária local em média e baixa tensão. No caso de ser alimentada em média tensão, no corpo da estação há uma subestação de entrada de energia que rebaixa esse valor para 220/127 V, no entanto com o intuito de acessibilizar e modernizar as estações, a CPTM contemplou em seus novos projetos, escadas rolantes e elevadores, entre outras melhorias, assim, aumentado a potência instalada em cada local, havendo portanto a necessidade de mudança de tensão primária de distribuição, e optou-se dessa forma a padronização de entrada de energia em 13,8 kV.

A Tabela 2.1 demonstra os padrões atuais e futuros das tensões de entrada dos empreendimentos alimentados pela(s) concessionária(s) em média tensão.

**Tabela 2.1 - Resumo dos padrões de entrada em média e baixa tensão.**

Linha	Nº de estações e prédios	Padrão de Entrada Atual		Plano de Modernização	
		220/127 V	13,8/13,2 kV	Dentro do plano	Fora do plano
<b>7</b>	18	11	7	11	0
<b>8</b>	23	11	12	8	3
<b>9</b>	20	0	20	2	0
<b>10</b>	13	8	5	6	2
<b>11</b>	13	4	9	4	0
<b>12</b>	13	5	8	3	2
<b>13</b>	2	0	2	2	0
<b>TOTAL</b>	102	39	63	36	<b>7</b>

## 2.2. LINHA DE DISTRIBUIÇÃO INTERNA

O modelo de eletrificação da EFSJ era composto por subestações primárias que recebiam de uma linha de 88 kV da concessionária a energia necessária para o funcionamento sistema. Essa energia era rebaixada 33 kV trifásicos e então distribuída para as subestações adjacentes através de uma linha de distribuição própria.

A filosofia desse modelo se mantém até os dias atuais, porém com algumas mudanças nos níveis de tensão de entrada (88/138 kV) e da linha de distribuição (34,5 kV).

Essa distribuição interna é feita através de duas linhas redundantes de 34,5 kV trifásico, que são apoiadas, na grande maioria do seu trecho, nos próprios postes e pórticos que sustentam a rede aérea de tração e os circuitos de sinalização ferroviária conforme Figura 2.1.

**Figura 2.1 - Serviço de migração de pórtico de sustentação dos sistemas de energia da CPTM**



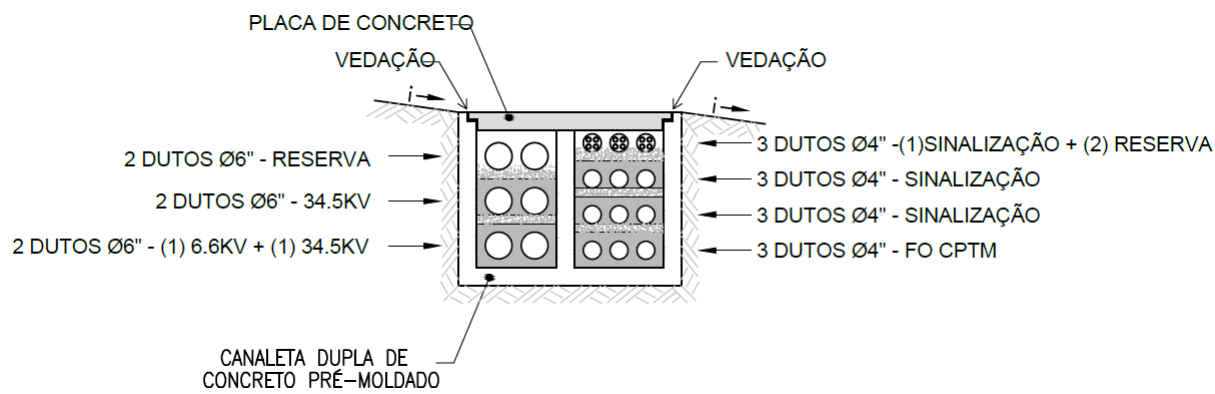
Outro modelo de linha de distribuição foi adotado na recente obra de extensão da Linha 9. Sua nova subestação retificadora será alimentada pela subestação Cidade Dutra por meio de duas linhas redundantes de 34,5 kV trifásico e parte desse encaminhamento até a nova estação, será feito através de uma rede de dutos enterrados.

O modelo para o banco de dutos utilizado nesse empreendimento (vide Figura 2.2) é fabricado em concreto pré-moldado, com uma divisória entre os circuitos com o intuito de mitigar interferências eletromagnéticas.

Além dutos para o circuito de 34,5 kV, também foram previstos dutos para o sistema de sinalização e para sistemas de telecomunicação, além de dutos reservas.



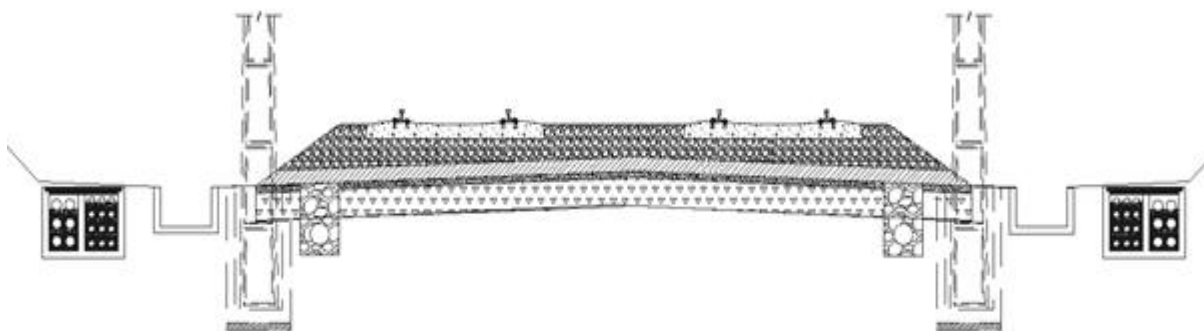
**Figura 2.2 - Seção tipo do banco de dutos da extensão da Linha 9 – Esmeralda**



Fonte: Documentos técnicos CPTM.

Esse banco de dutos acompanhará paralelamente a extensão da via férrea, nos seus dois lados (vide Figura 2.3), para redundância.

**Figura 2.3 - Distribuição típica do banco de dutos**



Fonte: Documentos técnicos CPTM.

### 2.3. PROBLEMAS COM FORNECIMENTO DE ENERGIA

Foram coletados dados sobre faltas ou oscilações no fornecimento de energia elétrica nas modalidades A2 (fornecimento de 88 a 138 kV), A4 (fornecimento de 2,3 kV a 25 kV) e B (fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV) nos empreendimentos da CPTM nos anos de 2014 e 2015.

**Tabela 2.2 - Total de falhas e do tempo em falta em subestações - 2014 e 2015**

2014	Falhas em alta tensão	Tempo	2015	Falhas em alta tensão	Tempo
<b>Linha 8</b>	1	-	<b>Linha 8</b>	1	00:36
<b>Linha 10</b>	1	-	<b>Linha 9</b>	2	01:52
			<b>Linha 10</b>	1	00:06

Nota: “-” significa que foram causadas por oscilações na rede

Tabela 2.3 - Total de falhas e do tempo em falta em estações - 2014

2014						
Linhas	Número de Falhas			Tempo em falta (h)		
	Baixa Tensão	Média Tensão	Total	Baixa Tensão	Média Tensão	Total
<b>7</b>	64	38	102	198:40	170:13	368:53
<b>8</b>	21	35	56	55:30	125:49	181:19
<b>9</b>	-	100	100	-	383:03	383:03
<b>10</b>	37	71	108	85:34	209:31	295:05
<b>11</b>	9	43	52	7:23	84:14	91:37
<b>12</b>	1	56	57	1:00	140:37	141:37
<b>Total geral</b>	<b>132</b>	<b>343</b>	<b>475</b>	<b>348:07</b>	<b>1113:27</b>	<b>1461:34</b>

Tabela 2.4 - Total de falhas e do tempo em falta em estações - 2015

2015						
Linhas	Número de Falhas			Tempo em falta		
	Baixa Tensão	Média Tensão	Total	Baixa Tensão	Média Tensão	Total
<b>7</b>	52	88	140	206:56	395:51	602:47
<b>8</b>	38	48	86	132:30	201:26	333:56
<b>9</b>	-	127	127	-	497:25	497:25
<b>10</b>	30	56	86	104:27	213:36	318:03
<b>11</b>	0	14	14	0:00	45:15	45:15
<b>12</b>	0	22	22	0:00	69:31	69:31
<b>Total geral</b>	<b>120</b>	<b>355</b>	<b>475</b>	<b>443:53</b>	<b>1423:04</b>	<b>1866:57</b>

Através das Tabela 2.3 e Tabela 2.4 nota-se que em ambos os anos, a quantidade de falhas e de horas em falta foi expressiva, tanto em baixo quanto em média tensão. Por outro lado a Tabela 2.2 demonstra que foi consideravelmente menor a quantidade de faltas de energia e oscilações na rede da concessionária para o fornecimento em A2.

No caso de falha em uma subestação, as subestações adjacentes suprirão a energia demanda, todavia há a necessidade de verificar se haverá passagem de demanda contratada nessas instalações, em casos extremos há a necessidade de contingenciamento operacional, ou seja, diminuir o número de trens em circulação.

Para as estações, em caso de falta de energia há a alimentação de emergência que é feita por grupo geradores a diesel ou por *nobreaks*. Essa alimentação emergencial assume as cargas emergenciais, como elevadores e

metade da iluminação. No entanto, atualmente somente 60 das 92 estações da CPTM possuem esse sistema. Nas demais, em caso de falta de energia da concessionária, todos os equipamentos ficam fora de serviço, inclusive a linha de bloqueios, e nesses casos é concedido ao usuário o direito de embarcar gratuitamente.

Além dos problemas citados no parágrafo acima, a oscilação na tensão de fornecimento de energia da concessionária (que ocorre principalmente em estações distantes dos seus centros de distribuição), causam consideráveis falhas e defeitos em equipamentos instalados nas dependências da CPTM.

## 2.4. CONTRATAÇÃO NO SETOR PÚBLICO

A Constituição da República Federativa do Brasil de 1988, define que exceto em casos especificados na legislação, quaisquer obras, serviços ou compras realizados pelas administrações públicas diretas, autárquicas e fundacionais da União, Estados, Distrito Federal, Municípios e as empresas públicas e sociedades de economia mista, deverão ser contratados através de processo de licitação pública que assegure igualdade de condições aos concorrentes.

A fim instituir normas para licitações e contratos da administração pública em suas diversas modalidades, foi criada em 1993 a Lei 8.666, que define que para obras e serviços de engenharia com valores estimados acima de R\$ 1.500.000,00 a modalidade de licitação definida é a concorrência, modalidade na qual se encaixa a maioria das obras e serviços de engenharia contratadas pela CPTM, que conforme já descrito no item 2.1, é uma empresa de economia mista.

Em uma concorrência admite-se a participação de qualquer interessado, desde que sejam atendidas as exigências contidas no edital da licitação, no qual também estão presentes os métodos de julgamento das propostas, que são divididas em critérios de, menor preço, melhor técnica ou através da combinação de técnica e preço.

### 3. DESENVOLVIMENTO

Almejando aumentar a confiabilidade e autonomia das estações, ou seja, diminuir o número de falhas em estações apresentadas nas Tabela 2.3 e Tabela 2.4 este trabalho pretende analisar a viabilidade técnica e econômica de se alimentar as estações através de um modelo análogo ao apresentado no item 2.2, onde as estações seriam alimentadas por linhas próprias de 13,8 kV proveniente de subestações primárias. Aproveitando o plano de modernização das estações CPTM, que prevê a padronização das entradas das estações nesse nível de tensão.

Para tanto são necessários levantamentos referentes à potência e demanda das estações, bem como a infraestrutura necessária ao empreendimento e os seus custos.

#### 3.1. ESTUDO DE DEMANDA E CONSUMO

A Tabela 3.1 foi elaborada através de dados obtidos em Bianchin (2016) e fornece informações quanto ao acréscimo da demanda de energia elétrica nas subestações primárias da CPTM.

**Tabela 3.1 - Resumo de acréscimo de demanda nas linhas da CPTM**

<b>Linhas</b>	<b>Demanda (kW)</b>
7	3.088
8	2.659
9	1.400
10	1.930
11	1.801
12	1.181
13	427

Através da análise de consumo de energia elétrica das estações e assumindo que elas já estivessem inseridas como cargas nas subestações primária, pode-se calcular uma estimativa de economia em reais, devido a diferenciado valor do kWh contratado em A4, B ou A2. Dessa forma, na Tabela 3.2, são apresentados valores de economia caso as estações fossem alimentadas no subgrupo A2 de fornecimento como consumidor livre.

Tabela 3.2 - Estimativa de economia com valores baseados em 2014 e 2015

Linha	Economia 2014	Economia 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

A Aneel (2010), define consumidor livre aquele que adquire energia elétrica no ambiente de contratação livre para unidades consumidoras que satisfaçam, individualmente, os requisitos (consumidores com carga igual ou maior que 10.000 kW, atendidos em tensão igual ou superior a 69 kV ou novos consumidores, cuja carga seja igual ou maior que 3.000 kW, atendidos em qualquer tensão). Onde o ambiente de contratação livre segmento do mercado no qual se realizam as operações de compra e venda de energia elétrica livremente, ou seja, é de livre escolha do consumidor o seu fornecedor de energia elétrica.

A maioria dos contratos de energia em alta tensão da CPTM são feitos no mercado livre, pois possuem melhores tarifas em relação ao mercado livre (onde ao consumidor só é permitido comprar energia da distribuidora detentora da concessão ou permissão na área onde se localizam as instalações).

### 3.2. ESTUDO TÉCNICO/FINANCEIRO DA INTERLIGAÇÃO

Para a comprovação da viabilidade técnica do projeto foi utilizado o *software* EWB (*Eletronic Work Bench*), com simulações dos circuitos de distribuição projetados, a fim de verificar qual a necessidade do novo sistema de alimentação e prever as ampliações nas subestações que se façam necessárias.

Na modelagem dos circuitos da simulação de alimentação das estações e prédios da CPTM, adotou-se o modelo no qual seja feita a simulação do pior cenário de distribuição, ou seja, quando todas as novas cargas demandam sua corrente máxima, e assim encontrar o valor da demanda máxima para as subestações.

### 3.2.1. Modelagem do circuito

Para a modelagem das subestações primárias dentro do software são necessários valores referentes a tensão a vazio, resistência interna, e corrente a vazio.

A tensão a vazio  $U_0$  pode ser encontrada através da regulação do transformador. Segundo Bird (2009) a regulação de transformadores possui valores típicos entre 1% (grandes transformadores) e 3% (pequenos transformadores).

A regulação de tensão de um transformador representa a variação da tensão em seu secundário, entre circuito a vazio e em carga máxima,  $U_L$ . A expressão 3.1 é dada por (PIRES, 2006):

$$U_0 = U_L + \frac{reg + U_L}{100} \quad 3.1$$

Como as potências demandas pelas estações são relativamente pequenas, para este estudo foi adotado a regulação de 3%.

Em posse do valor da regulação e da potência máxima da subestação  $P_L$ , a resistência interna  $R_L$  de uma subestação é dada pela expressão 3.2 conforme (PIRES, 2006):

$$R_L = \frac{reg}{100} \cdot \frac{U_L^2}{P_L} \quad 3.2$$

Com estes valores, a corrente a vazio  $I_0$  do transformador pode ser calculada pela equação 3.3:

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L} \quad 3.3$$

Para a modelagem da perda de potência no cabeamento é necessário o cálculo da resistência dos cabos de distribuição. Em (PIRES, 2006) é demonstrada A expressão 3.4, que calcula a resistência  $\rho_{cu}$ , por quilômetro a 40 °C, de cabos de cobre com resistividade de 0,01888  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ .

$$R_{cb} = \frac{\rho_{cu} \cdot 10^3}{S_{cu}} = \frac{18,8}{S_{cu}} \quad 3.4$$

A área  $S_{cu}$  corresponde a soma das áreas dos três cabos que formam o sistema trifásico de distribuição. Com as distâncias entre estações, subestações e oficinas, encontra-se a resistência gerada pelas linhas de distribuição entre elas. O dimensionamento das cargas é feito pela demanda de cada local.

Considerando  $P_e$  como as demandas exigidas por cada estação descritas no ANEXO A, a corrente elétrica  $I_e$  consumida por cada local é calculada através da expressão 3.5:

$$I_e = \frac{P_e}{U_{vazio}} \quad 3.5$$

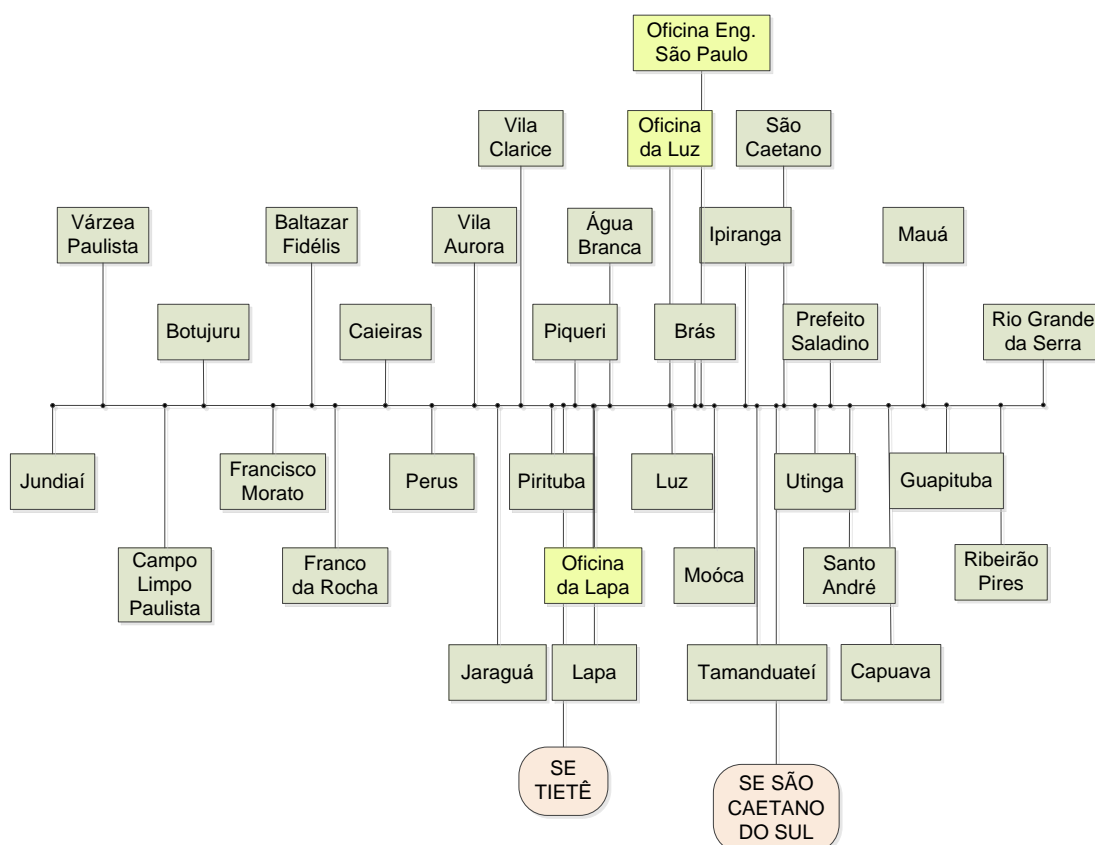
### 3.2.2. Estudo técnico de interligação em 13,8 kV

Neste estudo, o sistema de alimentação das estações, foi dividido por par de linha (ou trio), devido a baixa potência demandada pelas estações (vide Tabela 3.1). Dessa forma, considerou-se a adequação de uma subestação para a alimentação em 13,8 kV para cada linha.

Seguindo essa premissa, considerou-se o sistema conforme figuras abaixo.

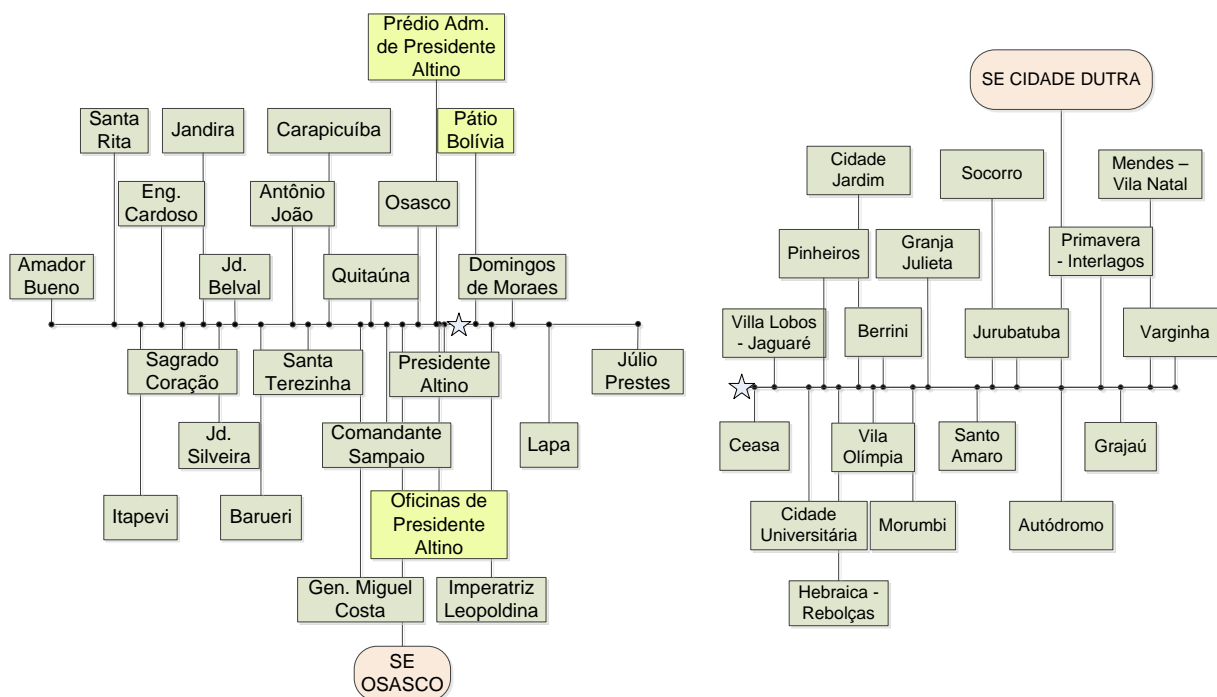
As estações das linhas 7 e 10 serão alimentadas pelas subestações Tietê e São Caetano do Sul (conforme Figura 3.1);

**Figura 3.1 - Configuração da alimentação das estações em 13,8 kV para as linhas 7 e 10.**



As estações das linhas 8 e 9 serão alimentadas pelas subestações Osasco e Cidade Dutra (vide Figura 3.2);

**Figura 3.2 - Configuração da alimentação das estações em 13,8 kV para as linhas 8 e 9.**



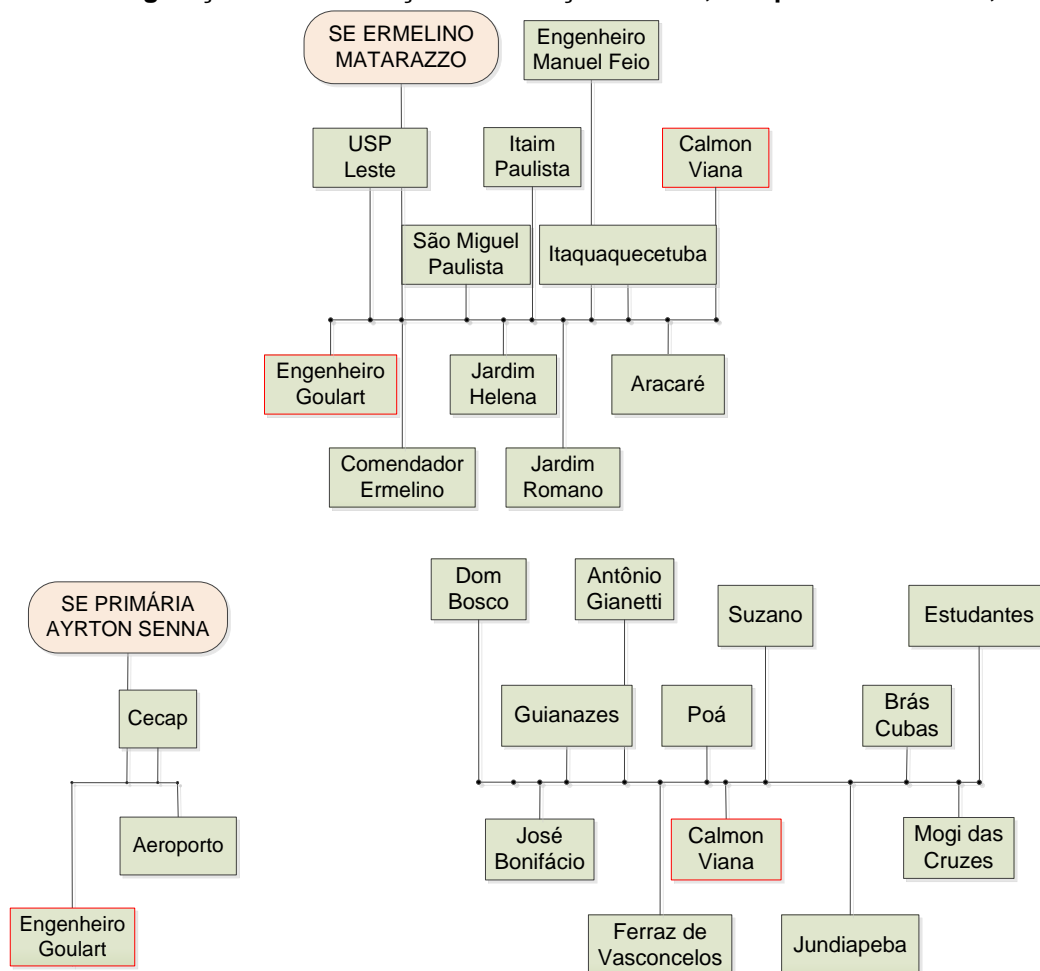
Obs: a estrela é o ponto de interligação entre as duas linhas.

As estações das linhas 11, 12 e 13 serão alimentadas pelas subestações Calmon Viana e Ermelino Matarazzo. A estação Brás da linha 12, está inclusa no circuito das linhas 7 e 10, portanto, a linha de distribuição da Linha 11 se inicia na estação Dom Bosco e a da Linha 12 se inicia na estação Eng. Goulart (vide Figura 3.3).

As estações Barra Funda da linha 8, Corinthians-Itaquera da linha 11, e Tatuapé da linha 12, possuem alimentação administrada pela Companhia do Metropolitano de São Paulo (Metrô-SP) e não foram incluídas nesta interligação.



**Figura 3.3 - Configuração da alimentação das estações em 13,8 kV para as linhas 11, 12 e 13.**



Obs: as estações Engenheiro Goulart e Calmon Viana são os ponto de interligação entre as linhas

Foram realizadas simulações no *software* EWB a fim de validar as configurações propostas e verificar as perdas do sistema e se haveria necessidade de mudanças nas premissas adotadas.

Os resultados de demanda extra necessária para as subestações escolhidas com suas respectivas perdas se encontram na Tabela 3.3:

**Tabela 3.3 - Demanda máxima para as subestações primárias na distribuição em 13,8 kV**

Subestação Primária	Linha	Potência Total [MVA]	Demanda Máxima [MW]
Tietê	7	10	3,236
São Caetano	10	10	2,650
Osasco	8	10	2,722
Cidade Dutra	9	10	1,408
Calmon Viana	11	5	1,514
Ermelino Matarazzo	12	5	1,164

Adotou-se transformadores de 88-138 kV/13,8 kV de 5 MVA, por serem padrão da maioria dos fabricantes. E através das simulações notou-se que para o sistema das linhas 7/10 e 8/9, seriam necessários 2 desses transformadores em cada subestação, pois em caso de contingência (um transformador em manutenção ou com falha), um transformador sozinho não supriria todas as estações. Todavia, uma consideração feita nesse trabalho é de que os transformadores de uma mesma subestação, em operação normal, não seriam ligados em paralelo. Os circuitos simulados são apresentados no APÊNDICE A.

Conforme apresentado no item 2.2, linhas de distribuição podem ser feitas utilizando um sistema aéreo por meio de postes, ou subterrâneo, por uma rede de dutos. Para uma decisão do método a ser aplicado é requerido um estudo comparativo entres os custos de implantação e de equipamentos de cada sistema.

A Tabela 3.4 relaciona a quantidade da rede de distribuição em 13,8 kV que deve ser implantada para este estudo:

**Tabela 3.4 - Demonstrativo dos trechos para implantação da rede de distribuição em 13,8 kV**

Linha	Trecho para a rede de distribuição em 13,8 kV				TOTAL
	Local Inicial	km	Local Final	km	
7	Estação Luz	00+000	Estação Jundiáí	60+492	60+492
8	Estação Julio Prestes	00+718	Estação Amador Bueno	42+339	41+621
9	Ligação com a Linha 8	13+245	Estação Varginha	45+820	33+575
10	Estação Luz	00+000	Estação Rio Grande da Serra	36+677	36+677
11	Estação Dom Bosco	20+563	Estação Estudantes	50+641	30+078
12	Estação Eng. Goulart	15+438	Ligação com a Linha 11	41+065	25+627
13	Ligação com a Linha 12	14+620	Est. Aeroporto-Guarulhos	24+235	09+651
					237+685

Para o cálculo da distribuição aérea, adotou-se posteamento com vãos de 80 m, com base na NBR 15688 de 2009, que trata de redes de distribuição aérea de energia elétrica com cabos nus e considera como usual vãos primários de até 80 m.

Para realizar o levantamento financeiro da implantação, é preciso considerar que o preço real do empreendimento dependerá das propostas a serem apresentadas pelas empresas que desejam participar da sua licitação. Portanto, para um estudo comparativo aceitável, foram utilizados valores retirados de

contratos atuais já firmados com a CPTM, que possuem os serviços e materiais necessários. Estes valores, quando necessário pela época de sua contratação, serão reajustados para os índices do ano de 2015, e os quantitativos serão definidos através de um projeto básico, para assim se obter uma previsão econômica deste projeto.

Portanto para a execução desta rede de alimentação redundante nos 237,685 km necessários, e se utilizando dos valores de materiais e serviços levantados, chega-se ao seguinte comparativo entre os modelos de distribuição:

**Tabela 3.5 - Comparativo entre os custos dos modelos de distribuição em 13,8 kV**

Linha	Trecho de implantação [km]	Modelo de Distribuição	
		Aérea	Enterrada
7	60,492	R\$ 17.207.333,49	R\$ 179.058.981,65
8	41,621	R\$ 11.841.668,68	R\$ 123.199.991,32
9	33,575	R\$ 9.548.210,88	R\$ 99.383.477,30
10	36,677	R\$ 10.433.340,60	R\$ 108.565.533,79
11	30,078	R\$ 8.549.858,82	R\$ 89.032.203,43
12	25,627	R\$ 7.294.340,50	R\$ 75.857.047,59
13	9,615	R\$ 2.745.301,87	R\$ 28.460.823,06
TOTAL	237,685	R\$ 67.620.054,83	R\$ 703.558.058,14

É notável a diferença de custos entre os modelos, sendo o sistema de distribuição enterrado demonstrou ser muito mais custoso que o modelo de distribuição aérea. Isso pode ser explicado pela maior intervenção necessária para a implantação de uma rede de dutos, e pelo preço mais alto de um cabeamento isolado em comparação com o nu.

As subestações Tietê, São Caetano, Osasco, Cidade Dutra, Calmon Viana e Ermelino Matarazzo, todas selecionadas como subestações primárias para este sistema, necessitarão da implantação de transformadores de 88 kV/13,8 kV, e seus respectivos equipamentos de proteção e controle.

Já em relação às estações de passageiros, em 7 estações serão necessárias de intervenção completa (Luz, Júlio Prestes, Amador Bueno, Santa Rita, Brás, Santo André e Calmon Viana), para esses casos, a fim de atingir o exposto neste trabalho, é previsto neste estudo a implantação, nessas estações, de uma subestação de entrada de energia com um transformador de 500 kVA, 13,8 kV/220-127V, e cabines primárias com todos seus equipamentos e proteções necessários.

Para os demais empreendimentos, é necessário a adequação das cabines existentes para que a entrada de energia seja redundante.

Logo, o custo total de implantação da interligação dos sistemas de energia da CPTM em 13,8 kV, considerando os dois métodos de distribuição, pode ser resumido na Tabela 3.6:

**Tabela 3.6 - Custo total da integralização em 13,8 kV**

<b>Integralização em 13,8 kV</b>			
<b>Atividade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Custo Total (R\$)</b>	
		<b>Aérea</b>	<b>Enterrada</b>
Rede de Distribuição	237,685 km	R\$ 67.620.054,83	R\$ 703.558.058,14
Subestações Primárias em 88-138/13,8 kV	6 un	R\$ 27.000.000,00	
Cabines em 13,8 kV nas Estações	95+7(novas) un	R\$ 31.931.317,12	
		R\$ 126.551.371,95	R\$ 762.489.375,22

### 3.2.3. Previsão de retorno dos investimentos

Para efeito de comparação entre o tempo de retorno destes empreendimentos, será utilizado os dados de economia presentes na Tabela 3.7. Se expandindo os valores de economia do ano de 2015 para os próximos anos, ao se utilizar apenas contratos de energia em A2, em um mercado livre, chegamos aos seguintes resultados:

**Tabela 3.7 - Previsão de retorno dos investimentos**

<b>Modelo de Integralização</b>	<b>Investimento</b>	<b>Economia Anual</b>	<b>Retorno em anos</b>
13,8 kV - Distribuição aérea	R\$ 126.551.371,95	R\$ 9.326.842,38	13,6
13,8 kV - Distribuição enterrada	R\$ 762.489.375,22	R\$ 9.326.842,38	81,7

Vale lembrar que o tempo estimado de retorno leva em consideração somente os custos de investimento (equipamentos e implantação), não foram estipulados neste trabalho os custos de manutenção da rede.

## CONCLUSÃO

Este trabalho buscou fundamentações técnicas e financeiras para uma possível interligação dos sistemas de alimentação da CPTM. Procurou-se evidenciar a possibilidade desta interligação considerando as modernizações a serem feitas nas estações e a necessidade de intervenções adicionais em poucas subestações existentes.

O levantamento das demandas e do consumo de energia das estações, bem como das demais instalações, foi ferramenta fundamental para este estudo, pois além de permitir uma previsão de retorno dos investimentos propostos, foi a base para quantificar a potência extra que o sistema proposto deveria prover.

Utilizando-se de experiências do setor ferroviário, pode-se elaborar um sistema de distribuição de energia, que através de simulações, demonstrou ser tecnicamente viável e com retorno econômico previsto em pouco mais de 13 anos.

Usando-se como base os resultados e informações presentes neste trabalho, é possível orientar uma futura decisão técnica para esta interligação. Comparando-se equipamentos, situações operacionais, valores de implantação e quantidade 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. 54 p. Monografia - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2016.

BIRD, J. **Circuitos Elétricos**: teoria e tecnologia. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**, Brasília: Senado, 1988.

\_\_\_\_\_. 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.

CPTM. A Companhia. São Paulo, 2014. Disponível em:  
<<http://www.cptm.sp.gov.br/a-companhia/Pages/a-companhia.aspx>>. Acesso em: 01 dez. 2015.

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 13,8 kV

Figura 3.4 - Circuito Linhas 7 e 10, em 13,8 kV

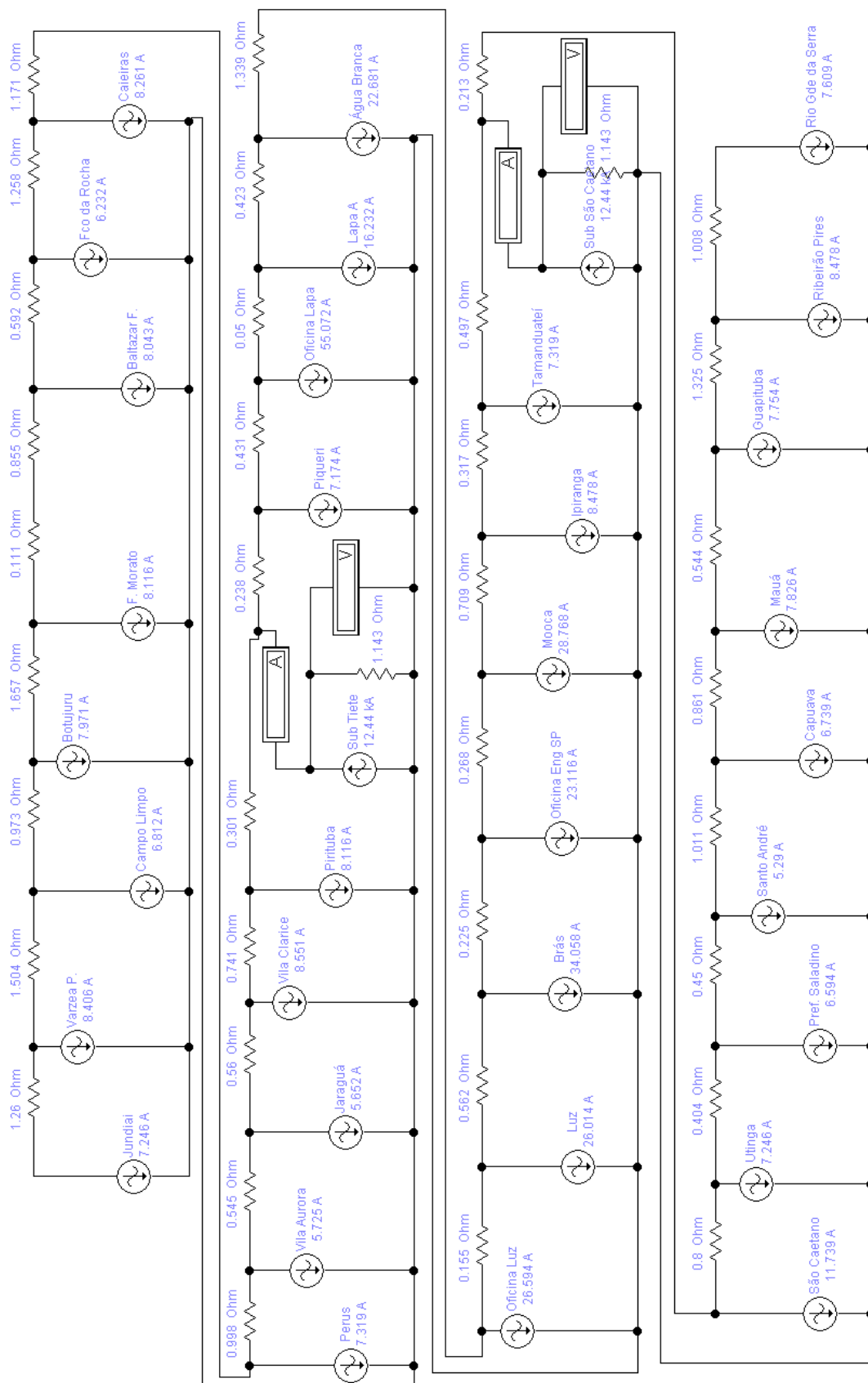
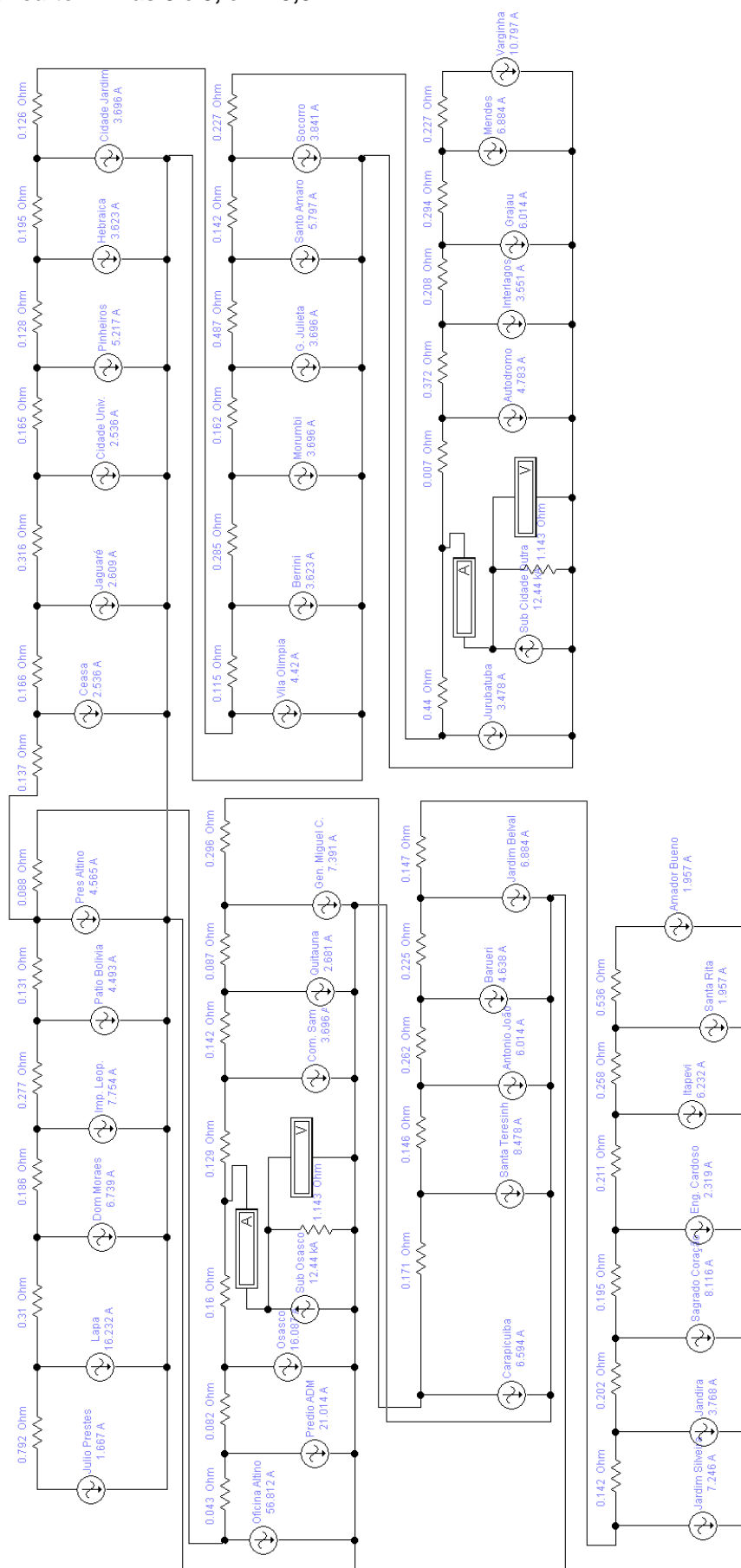
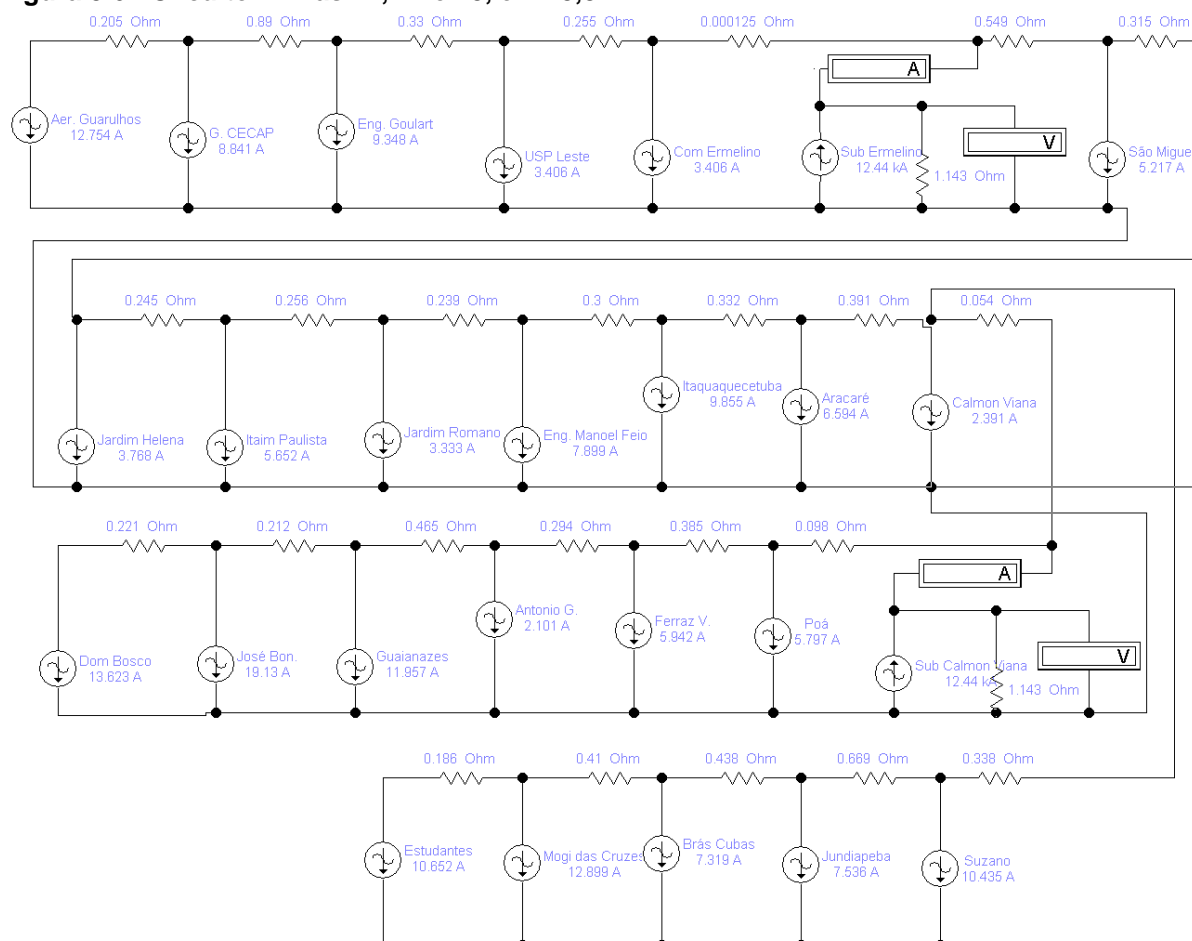


Figura 3.5 - Circuito Linhas 8 e 9, em 13,8 kV





**Figura 3.6 - Circuito Linhas 11, 12 e 13, em 13,8 kV**



## ANEXO A - Demanda exigida por cada estação

**Quadro A.1 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda Líquida para os empreendimentos da linha 07 - Rubi.**

Estação/Outros	Potência Instalada (kW)	Demanda para a Entrada de Energia (kW)	Demanda Líquida (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	503,45	335,83	80,00
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
<b>TOTAL</b>	<b>16.073,94</b>	<b>11.102,92</b>	<b>3.088,00</b>

**Quadro A.2 -Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda Líquida para os empreendimentos da linha 08 - Diamante.**

Estação/Outros	Potência Instalada (kW)	Demanda para a Entrada de Energia (kW)	Demanda Líquida (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
<b>TOTAL</b>	<b>14.389,96</b>	<b>9.848,87</b>	<b>2.659,00</b>

**Quadro A.3 - Potência instalada, demanda para a entrada de energia e demanda Líquida para os empreendimentos da linha 09 - Esmeralda.**

Estação/Outros	Potência Instalada (kW)	Demanda para a Entrada de Energia (kW)	Demanda 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-Jaguareé	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
<b>TOTAL</b>	<b>9.057,14</b>	<b>6.502,42</b>	<b>1.400,00</b>

**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)	Demanda para a Entrada de Energia (kW)	Demanda 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
Prefeito 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
<b>TOTAL</b>	<b>10.013,80</b>	<b>6.871,28</b>	<b>1.930,00</b>

**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)	Demanda para a Entrada de Energia (kW)	Demanda 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
Jundiapéba	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
<b>TOTAL</b>	<b>9.992,26</b>	<b>6.707,04</b>	<b>1.801,00</b>

**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)	Demanda para a Entrada de Energia (kW)	Demanda 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
<b>TOTAL</b>	<b>7.081,94</b>	<b>4.685,00</b>	<b>1.181,00</b>

**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)	Demanda para a Entrada de Energia (kW)	Demanda 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
<b>TOTAL</b>	<b>2.219,67</b>	<b>1.585,25</b>	<b>427,00</b>