



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO -III

GRUPO DE ESTUDO LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

ESTUDO TÉCNICO E ECONÔMICO DAS LINHAS TRANSMISSÃO PIRITUBA BANDEIRANTES 1 – 2 E 3 – 4 PARA OPERAR COM UM CAMPO MAGNÉTICO DE 1 μ T

**José de Melo Camargo (*)
ELETROPAULO**

**Ligia Maria Rodrigues Mendes
ELETROPAULO**

**Carlos Alberto Belardo
Pri Engenharia**

**Mario Leite Pereira Filho
FUSP**

RESUMO

O objetivo deste estudo é detalhar e custear as soluções técnicas propostas para manter um nível de campo magnético máximo de 1 μ T em qualquer ponto, proveniente das linhas de transmissão, entre o trecho da Rua Ubiracica até a ETD Butantã, abrangendo os bairros City Boaçaba e Alto de Pinheiros na região Oeste da cidade de São Paulo, conforme decisão judicial sem a redução do fornecimento de energia neste local.

O estudo mostra o modo operativo e o motivo da realização deste projeto, com a descrição do projeto de reconstrução que foi realizado e todo histórico deste processo judicial, conseguido através de liminares a realização desta reconstrução e as ações a após conclusão das obras para atender as determinações judiciais.

O artigo descreve as possíveis soluções técnicas de serem realizadas em função do nível de exposição determinado por esta decisão judicial, utilizando simulações matemáticas para a determinação dos mesmos e, em função deste resultado como viabilizar a reconstrução deste sistema elétrico e seus impactos para o meio ambiente e para a sociedade civil.

A partir dos resultados de simulação das possíveis soluções técnicas o impacto que acontecerá tanto na operação do sistema elétrico envolvido como o impacto ambiental na região, durante as possíveis obras a serem realizadas e na operação e manutenção. Realizaram-se também um estudo econômico destas soluções e conseqüentemente os prazos de execução, pois a decisão judicial determinar um prazo de execução máximo de 6 meses.

PALAVRAS-CHAVE

Campo magnético, linha de transmissão

1.0 - INTRODUÇÃO

A Eletropaulo possui um sistema elétrico composto pelas linhas de transmissão aérea, LTA Pirituba Bandeirantes 1–2 e 3–4, que interligam três subestações pertencentes à CTEEP (Companhia Transmissora de Energia Elétrica Paulista) alimentando a região Noroeste e Sudoeste da cidade de São Paulo, através de três subestações de distribuição de energia.

Em 2000, iniciou-se o projeto de reconstrução da linha de transmissão Pirituba Bandeirantes 3-4, tensão 88/138 kV, para atender ao crescimento de energia nesta região, onde têm uma grande rede de hospitais, grandes centros financeiros e comerciais da cidade de São Paulo e para o país. Esta reconstrução foi embargada pelo

poder judiciário. Este embargo baseou-se sobre os possíveis efeitos que o campo magnético, possa causar na população em geral que reside ao lado das mesmas.

O objetivo deste estudo é detalhar e custear as soluções técnicas propostas para manter um nível de campo magnético máximo de $1 \mu\text{T}$ em qualquer ponto, proveniente da linhas de transmissão, entre o trecho da Rua Ubiracica até a ETD Butantã, abrangendo os bairros City Boaçaba e Alto de Pinheiros na região Oeste da cidade de São Paulo conforme decisão judicial, sem a redução do fornecimento de energia neste local.

2.0 - CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO SISTEMA ELÉTRICO

Na área envolvida no processo judicial, a Eletropaulo possui na faixa de segurança 2 (duas) linhas de subtransmissão composta de 2 (dois) circuitos cada linha. A faixa de segurança possui uma largura de 10 metros implantada desde da década de 1930, sendo de propriedade da Eletropaulo.

Analisando o ambiente onde esta faixa de segurança está implanda com relação aos dois bairros envolvidos, City Boaçaba e Alto de Pinheiros, temos:

- No bairro City Boaçaba, a faixa de segurança está implantada no canteiro central composto pela Avenida Bacuru, entre a Rua Ubiracica e a Avenida Professor Fonseca Rodrigues.
- No bairro Alto de Pinheiros, a faixa de segurança está implantada paralelo a Rua Becheior da Cunha e do outro lado da faixa de segurança, os fundos das residencias da Rua Bennet.

2.1 Características Antes da Reconstrução

As linhas de subtransmissão instaladas nesta faixa de segurança possuíam uma disposição física conforme mostra a Figura 1. As mesmas operam nesta configuração desde da década de 1960/70, quando foram reconstruídas para operar na tensão de 88 kV, pois anteriormente, opevam na tensão de 40 kV.

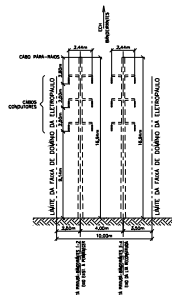


FIGURA 1 – Disposição das linhas de subtransmissão antes da reconstrução.

Cada linha de subtransmissão, LTA Pirituba Bandeirantes 1-2 e 3-4, possuía as seguintes características elétricas:

- Tensão nominal: 88 kV;
- Tensão de operação: 88 kV;
- Capacidade máxima da instalação: 119 MVA;
- Número de circuitos: 2 para cada linha (total de 4 circuitos);
- Cabo: bitola 636 MCM;
- Cabo por circuito: 1 cabo por fase;
- Capacidade máxima de corrente do cabo por fase: 780 A;
- Capacidade máxima de corrente em operação normal: 390 A em cada circuito;
- Capacidade máxima de corrente em condição de contingência: 780 A em um circuito e o outro zero ampères.

2.2 Características Após a Reconstrução

Em 2000, a Eletropaulo iniciou o processo de reconstrução da LTA Pirituba Bandeirantes 3-4 para atender as necessidades de carga na região que a mesma fornece energia. Enquanto que a LTA Pirituba Bandeirantes 1-2 não havia naquele momento necessidade de realizar qualquer obra. A Figura 2 mostra a disposição física das linhas após sua reconstrução.

A linha de subtransmissão LTA Pirituba Bandeirantes 3-4, passou a ter as seguintes características elétricas:

- Tensão nominal: 138 kV;

- b. Tensão de operação: inicial 88 kV e futuro 138 kV;
- c. Capacidade máxima da instalação: 238 MVA para a tensão de 88 kV e 373 MVA para a tensão de 138 kV;
- d. Número de circuitos: 2;
- e. Cabo: bitola 636 MCM;
- f. Cabo por circuito: 2 cabos por fase;
- g. Capacidade máxima de corrente do cabo por fase: 1560 A;
- h. Capacidade máxima de corrente em operação normal: 780 A em cada circuito;
- i. Capacidade máxima de corrente em condição de contingência: 1560 A em um circuito e o outro zero ampères.

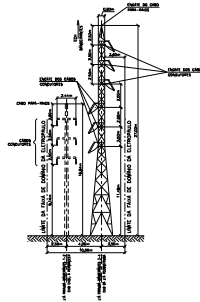


FIGURA 2 – Disposição das linhas de subtransmissão após a reconstrução.

A linha terminou sua reconstrução no ano de 2005 devido a varias solicitações da Eletropaulo, ANEEL e ONS, onde se mostrou a importância desta reconstrução para o sistema elétrico da Eletropaulo e para o sistema elétrico nacional, evitando-se assim, em caso de contingência no sistema, um blecaute na região de São Paulo. Com isso, através de uma liminar, a Eletropaulo pode concluir a reconstrução da linha, com o processo em andamento aguardando julgamento.

2.3 Operação e sistema de proteção das linhas de subtransmissão

Toda linha de subtransmissão da Eletropaulo é projetada e construída com 2 (dois) circuitos, para ser operada de forma que o carregamento máximo de cada circuito, não ultrapasse 50% da capacidade nominal do cabo. Isto permite que em caso de uma condição de contingência, pode-se carregar no máximo um circuito com 100% de sua capacidade e o outro circuito com 0%.

Estas linhas de subtransmissão de propriedade da Eletropaulo fazem uma interligação entre três subestações da empresa transmissora CTEEP, subestações Pirituba, Bandeirantes e Milton Fornasaro. Estas linhas através de subestações transformadoras de distribuição abastecem diversos bairros da região oeste e noroeste da cidade de São Paulo.

3.0 - SIMULAÇÕES DE CAMPO MAGNÉTICO

A partir do julgamento do processo judicial, onde estabeleceu que a linhas de subtransmissão localizadas na região, não poderiam emitir valor de indução magnética máxima de $1\mu\text{T}$ em qualquer local passível de presença humana a 1 metro de altura. Assim, realizou-se uma pesquisa técnica de redução do campo magnético emitido pela linha de subtransmissão Pirituba Bandeirantes 1-2 e 3-4, considerando:

- a. Aumento da largura da faixa de servidão;
- b. Aumento da altura da linha;
- c. Compactação e sequencia de fase;
- d. Uso de compensação ativa e passiva;
- e. Enterramento da linha com e sem o uso de blindagens.

3.1 Largura da faixa de segurança

A primeira análise realizada, foi com relação a largura de faixa de segurança desta linha, lembrando que a mesma possui uma largura de 10 metros.

A Figura 4 mostra uma das análises realizadas. Foram realizadas várias simulações de acordo com o modo operativo da linha e a suas condições de contingência. Concluindo que a faixa de segurança deveria ter uma largura de 91,6 metros, na condição operativa de ambas as linhas operarem com 100% em um circuito e 0% no outro circuito.

3.2 Aumento da altura da linha

O alteamento da linha de subtransmissão foi o segundo estudo realizado de acordo com os modos operativos da linha já apresentado. Observou-se, conforme mostrado na Figura 5, a linha deverá ter seu cabo inferior uma altura mínima de 35 metros, o qual deverá ser acrescido 1 metro para atender a decisão judicial, totalizando uma altura mínima de 36 metros.

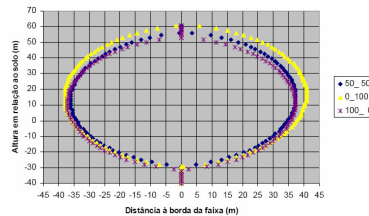


FIGURA 4 – Simulação para determinação da largura de faixa de segurança.

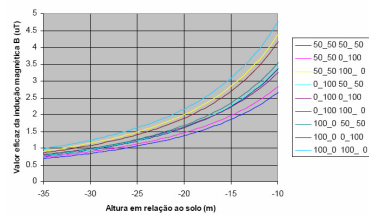


FIGURA 5 – Simulação para determinação da altura mínima da linha.

Observou-se nas simulações realizadas que para este nível de campo magnético, a configuração dos circuitos na linha de subtransmissão não contribui para obtenção de um valor mais conservativo.

3.3 Compactação e sequencia de fase

A NBR 5422 especifica os requisitos de distâncias de isolamento para linhas de transmissão e subtransmissão. As linhas em estudo apresentam pouca flexibilidade quanto à compactação, pois as distâncias já estão nos valores mínimos recomendados. A compactação adicional vai requerer a instalação de distanciadores no trecho aéreo do vão, o que, face as questões estéticas torna muito pouco atrativa esta solução.

Com relação à sequência de fase é mais eficiente o estudo. A Figura 6 mostra a região com valor de indução magnética menor para a sequência de fase ótima, conhecida como configuração de baixa reatância para as diversas condições operativas da linha.

Analisando a figura observa-se que na operação normal existe ganhos significativos, entretanto na análise em contingência a largura necessária continua sendo da ordem de 90 metros, de forma que a solução proposta não traz melhorias efetivas.

Uma forma mais elaborada de explorar a sequência de fase é a separação de fases. Entretanto, para circuitos verticais duplos a separação de fases requer aumento na quantidade e dimensões dos suportes na torre, acarretando aumento da largura de faixa e com eficiência mais baixa do que aquela de circuitos simples horizontal.

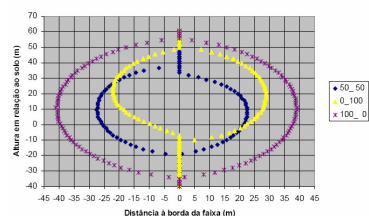


FIGURA 6 – Simulação para determinação da largura da faixa com análise na sequência de fase.

3.4 Compensação ativa e passiva

A compensação consiste em instalar condutores adicionais que, por indução, no caso passivo, conduzem correntes cujo campo magnético tem componente em oposição aquele da corrente original, reduzindo o valor da

indução magnética em uma certa região. Na compensação ativa a amplitude e a fase das correntes são impostas por um gerador independente, conseguindo uma eficiência maior que na compensação passiva.

A redução de campo magnético é mais eficaz colocando condutores do circuito de compensação o mais próximo possível dos condutores fase da linha. No caso dos circuitos 1-2, somente três condutores são necessários, enquanto para o circuito 3-4 são necessários 2 grupos de 3 condutores, devido ao deslocamento vertical entre os circuitos.

Para a compensação ativa dos circuitos 1-2, a amplitude e fase da corrente deve ser nula durante a operação normal e, quando em contingência, deve ter a mesma amplitude e fase oposta à da fase correspondente. Para os circuitos 3-4, a amplitude e fase da corrente nos condutores de compensação deve ter a mesma amplitude e fase oposta à fase correspondente em qualquer condição operativa.

A Figura 7 mostra que a largura de faixa de segurança caiu para 33 metros, indicando que mesmo com a compensação seria necessário aumentar a largura da faixa de segurança e elevar a altura do cabo mais baixo em 2 metros.

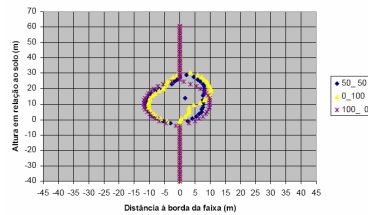


FIGURA 7 – Simulação para determinação da largura da faixa aplicando compensação ativa e passiva.

3.5 Uso de cabos subterrâneos

A simulação do campo magnético emitido pela linha subterrânea considerou o esquema de instalação padrão da Eletropaulo, aplicado em diversas linhas em operação, conforme mostra a Figura 8.

Foram realizadas simulações considerando 4 diferentes combinações de sequência de fase entre os circuitos 1-2 e 3-4 e, para cada sequência de fase, duas situações foram analisadas: com a blindagem dos condutores aterradas e não transpostas e com a blindagem dos condutores aterradas e transpostas, de forma que a indução ao longo do comprimento do cabo torna-se praticamente nula e conseqüentemente não há circulação de corrente nas blindagens.

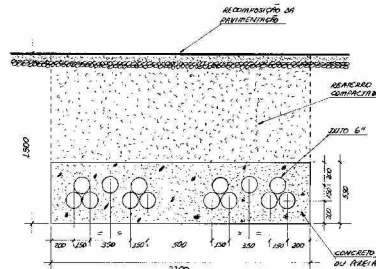


FIGURA 8 – Esquema de instalação padrão da Eletropaulo.

Concluiu-se que a sequência de fase ABC-BCA-CAB-ABC é a mais favorável, principalmente na situação em que as blindagens dos condutores não sofrem transposição, conforme mostra a Figura 9. Assim, foram realizadas simulações adicionais para esta sequência de fase, considerando as seguintes situações: presença de blindagem ferromagnética e presença de blindagem condutora.

A Figura 10 mostra a região de campo magnético inferior a $1 \mu\text{T}$ com uma blindagem condutora acima e na lateral dos cabos subterrâneos composta por 3 chapas de alumínio de $1/8''$ cada.

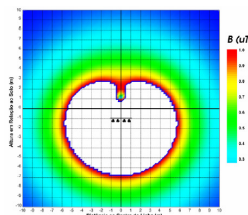


FIGURA 9 – Região de campo magnético menor $1\mu\text{T}$ na seqüência de fase ABC-BCA-CAB-ACB com transposição da blindagem dos condutores.

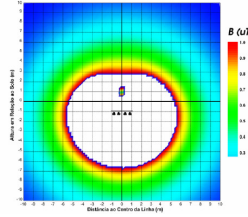


FIGURA 10 – Região de campo magnético menor $1\mu\text{T}$ na seqüência de fase ABC-BCA-CAB-ACB com transposição da blindagem dos condutores e uma blindagem condutora de alumínio.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos da profundidade necessária da instalação em operação normal. Conclui-se que a condição com transposição e com blindagem condutora é a mais favorável.

Tabela 1 – Profundidade necessária de instalação dos circuitos em operação normal.

Profundidade (m)	Sem Blindagem		Blindagem ferromagnético		Blindagem Condutora	
	Sem Transposição	Com Transposição	Sem Transposição	Com Transposição	Sem Transposição	Com Transposição
	5,0	4,2	5,4	4,2	2,0	2,4

A Tabela 2 apresenta um resumo dos valores calculados referentes à profundidade mínima dos cabos da linha de subtransmissão que deve ser considerada para que os níveis de indução magnética permaneçam abaixo de $1\mu\text{T}$.

Tabela 2 – Profundidade necessária de instalação dos circuitos em operação em contingência.

Profundidade (m)	Sem Blindagem		Blindagem Condutora	
	Sem Transposição	Com Transposição	Sem Transposição	Com Transposição
	9,6	10,8	4,2	4,6

4.0 - SOLUÇÕES TÉCNICAS

Com base na simulação matemática realizada do campo magnético elaborou-se alternativas técnicas e o impacto econômico para ter-se um campo magnético máximo de $1\mu\text{T}$ na superfície como determina a decisão judicial. Os estudos referentes a compactação e sequencia de fase e uso de compensação ativa e passiva não foram realizados, pois suas soluções necessitam de aumento de faixa de segurança.

4.1 Aumento da largura de faixa de segurança

O estudo realizado da largura de faixa de segurança determinou que a mesma deverá ter uma largura de 91,6 m. Para esta largura de faixa teria-se que desapropriar as casas e ruas próximas a linha de subtransmissão, que corresponde a uma área estimada envolvida de aproximadamente $171.537,07\text{ m}^2$ a um custo médio do metro quadrado na ordem de R\$ 5.000,00. Conclui-se que o custo total para aumento da faixa de segurança é da ordem de R\$ 862.506.720,77.

4.2 Alteamento do cabos

Conforme relatório de simulação matemática de campo magnético deve-se realizar o alteamento dos cabos para uma altura mínima de 36,5 metros em sua catenária para obtenção de um campo magnético de $1\mu\text{T}$ em qualquer ponto da faixa de segurança.

Utilizando os padrões de torres da Eletropaulo, a Figura 11 mostra um tipo de silhueta da torre tipo 1ACPE que poderá ser aplicada nestas linhas de subtransmissão. Esse tipo de torre tem a altura total de 66,4 metros e altura do primeiro cabo de 39 metros. Para este tipo de torre, a faixa de segurança de 10 metros existente atualmente permite sua instalação.

O custo total de execução do alteamento dos cabos utilizando a torre tipo 1ACPE é R\$ 44.730.000,00, e seu prazo de execução é de aproximadamente de 2 anos e 6 meses, caso todos os processos sejam resolvidos a contento conforme planejado.

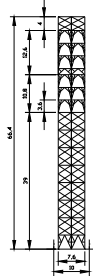


FIGURA 11 – Silhueta da torre 1ACPE.

4.3 Substituição da linha aérea por subterrânea

Conforme relatório de simulação matemática de campo magnético este tipo de solução para ser realizada altera toda a configuração do sistema elétrico mostrado na Figura 3 com relação ao sistema de operação e ao sistema de proteção descrito.

Além desta alteração operativa e de proteção das linhas LTA Pirituba – Bandeirantes, temos uma alteração na forma construtiva desta linha subterrânea em relação a uma linha de subtransmissão subterrânea normal.

4.3.1 Projeto construtivo da linha subterrânea

O projeto construtivo é desenvolvido a partir da definição do melhor traçado entre os pontos envolvidos e de um levantamento de interferência do subsolo com relação a águas pluviais, esgoto, canalização de gás, telefonia, e também de uma análise técnica dos tipos de solos existentes neste traçado.

Em média as linhas subterrâneas da Eletropaulo possuem uma profundidade de aproximadamente de 1,5 a 2,5 metros em relação à superfície. Para esta profundidade aplicam-se três tipos de construção:

Para esta aplicação a construção do túnel é a melhor opção técnica em relação à vala a céu aberto e ou MND.

A profundidade média prevista para o túnel será de 10 a 12 metros, tendo uma altura de aproximadamente de 2 metros, permitindo a instalação de cada linha LTA Pirituba Bandeirantes 1–2 em uma lateral e a outra LTA Pirituba Bandeirantes 3–4 em outra lateral. Também será necessário um sistema de circulação de ar forçado para o controle de temperatura dentro do túnel. Os custos estimados são da ordem de R\$ 24.280.000,00.

4.3.2 Cabo subterrâneo

Neste projeto será cabo subterrâneo do tipo XLPE a seco. Adotado-se a mesma bitola do cabo para ambas as linhas de subtransmissão, prevendo-se futura ampliação, pois pelas necessidades do limite de campo magnético estipulado de $1 \mu\text{T}$ tem-se que realizar já e, não no futuro como seria normalmente. Segue abaixo as características do cabo a ser aplicado nesta instalação.

- a. Cabo: XLPE 2000 mm²
- b. Cabos por fase: 1
- c. Corrente: 1600 A
- d. Tensão de operação: 88 kV
- e. Tensão nominal: 138 kV

Para esta profundidade e pela capacidade de transporte de energia prevista, este tipo de instalação, vala a céu aberto ou MND, além das dificuldades normais de instalação e das questões de segurança do trabalho, tem-se um aumento da temperatura do cabo subterrâneo. Como consequência deste aumento de temperatura haverá uma diminuição na capacidade de corrente a ser transportada. Assim, será necessário da duplicação da bitola do cabo, isto é, colocar dois cabos por fase, isto provoca um encarecimento do projeto, pois a duplicação do cabo subterrâneo representa um custo muito maior do que a construção de um túnel.

Outro fato preocupante é que a blindagem de alumínio ou como a de ferro proposto na simulação matemática, são materiais que possuem reação química com a umidade do solo, acompanhado do aquecimento do mesmo devido a passagem de corrente pelo cabo, provocando uma reação química e perdas de suas propriedades, isto significa um aumento do campo magnético na superfície minimizado pela blindagem instalada.

O custo estimado do cabo e seus acessórios são da ordem de R\$ 1.000,00/metro, considerando o comprimento do cabo de 2400 metros por fase do circuito, tem-se um custo total estimado na ordem de R\$ 28.800.000,00.

4.3.3 Sistema elétrico no trecho subterrâneo

A operação e proteção de uma linha utilizando cabo subterrâneo é totalmente diferente de uma instalação de uma linha aérea. Para preservar a máxima condição operativa do sistema temos que adotar neste trecho das linhas de subtransmissão o diagrama unifilar mostrado na Figura 12, onde deve-se ser instalado os seguintes subestações e seus equipamentos.

- Subestação de transição ETR Leopoldina próxima a Rua Ubiracica: Subestação de transição para a passagem da linha aérea para subterrânea, com a instalação de disjuntores, seccionadoras, transformadores de corrente, transformadores de potencial e um sistema de proteção para a linha aérea e subterrânea neste ponto. Como a aquisição de uma área extra ao lado da faixa para a implantação desta subestação de aproximadamente de 600 m².
- Subestação de transição ETR Butantã dentro da ETD Butantã: Subestação de transição para a passagem da linha subterrânea para aérea, com a instalação de disjuntores, seccionadoras, transformadores de corrente, transformadores de potencial e um sistema de proteção para a linha aérea e subterrânea neste ponto.
- Subestação de transição ETR Bela Aliança na ETD Ponta Porã: Subestação de transição para permitir a conexão da ETD Ponta Porã e ETD Bela Aliança, com a instalação de disjuntores, seccionadoras, transformadores de corrente, transformadores de potencial utilizando uma blindada GIS e um sistema de proteção neste ponto.

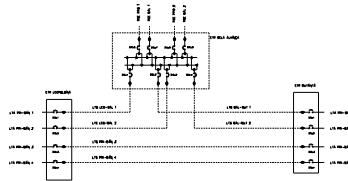


FIGURA 12 – Diagrama unifilar proposto para o trecho subterrâneo.

Os custos totais é da ordem de R 78.365.000,00, envolvidos para a substituição da linha aérea em linha subterrânea para um prazo estimado de 45 meses aproximadamente.

5.0 - CONCLUSÃO

A Tabela 3 resume os custos envolvidos em função das soluções técnicas estudadas.

Tabela 3: Custos totais das soluções técnicas propostas.

Solução técnica	Custo (R\$)	Prazo
Aumento da largura de faixa de segurança	852.368.060,00	26 meses
Alteamento dos cabos	44.730.000,00	30 meses
Substituição da linha aérea por subterrânea	78.365.000,00	45 meses

Face aos custos a utilização de estruturas padrão está totalmente descartada tendo em vista o aumento excessivo de faixa.

Como o alteamento dos cabos apresenta custo mais baixo é a solução indicada.

Os valores de custos são aqui estimados podendo ter uma variação em função da economia do país, principalmente com relação aos equipamentos importados, cabo subterrâneos, blindada GIS e a variação do custo de mão de obra nas obras civis.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Pereira Filho, M. L. – Relatório Técnico nº 96319-205 de Agosto/2007

(2) Instruções Técnicas de projeto e operação da Eletropaulo

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

José de Melo Camargo

Nascido em São Paulo, SP em 24 de outubro de 1959.

Graduação (1985) em Engenharia Elétrica: UMC – São Paulo

Mestrado em Sistema de Potência (2008) : Universidade Federal de Uberlândia

Empresa: Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo, desde 1986

Carlos Alberto Belardo

Nascido em São Paulo – SP em 24 de maio de 1960.

Graduado em 1982 – Engenharia Civil – Universidade São Francisco

Pós-Graduado em 1987 – Administração de Empresas – Universidade Mackenzie

Empresa: Sistema Pri Engenharia, desde 2008

Ligia Maria Rodrigues Mendes

Nascida em São Paulo, em 13 de novembro de 1955.

Graduada em 1983 – Engenheira Química – FAAP

Graduada em 1989 – Engenharia Civil – FESP

Empresa: Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo, desde 1986

Mario Leite Pereira Filho

Empresa: Instituto Tecnológico de Pesquisa - IPT