

DANIEL CHIARAMONTE PERNA

**COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS SUBESTAÇÃO E REDE AÉREA DE
TRAÇÃO EM CC E CA**

São Paulo
2016

DANIEL CHIARAMONTE PERNA

**COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS SUBESTAÇÃO E REDE AÉREA DE
TRAÇÃO EM CC E CA**

Monografia apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para a obtenção do Título de
Especialista em Tecnologia
Metro Ferroviária

São Paulo
2016

DANIEL CHIARAMONTE PERNA

**COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS SUBESTAÇÃO E REDE AÉREA DE
TRAÇÃO EM CC E CA**

Monografia apresentada à
Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo
para a obtenção do Título de
Especialista em Tecnologia
Metro Ferroviária

Área de Concentração:
Engenharia Elétrica

Orientador:
Prof. Dr. Cassiano Lobo Pires

São Paulo
2016

Perna, Daniel Chiaramonte.

Comparação dos sistemas subestação e rede aérea de tração em CC e CA. / D. Perna -- São Paulo, 2016.

51 p. p.

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

1.Tração elétrica 2.Corrente alternada monofásica. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia. II.t.

Dedico este trabalho de conclusão de curso à minha esposa Vanessa e minha filha Laura pela paciência e dedicação ao longo da minha carreira profissional na Companhia Paulista de Trens Metropolitanos e das minhas constantes ausências por dedicação ao sistema de transporte público do Estado de São Paulo.

Daniel Chiaramonte Perna

AGRADECIMENTOS

Aos amigos e colegas da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos pela compreensão, paciência, colaboração e apoio durante os meus estudos acadêmicos.

Aos amigos e colegas da Companhia do Metropolitano de São Paulo pela ajuda durante o curso de especialização.

Aos Engenheiros Erick Santiago Cardoso, Odail Cardoso, Heitor Luiz Itami, Marcelo Ryoji Teranishi, Marcos Lira de Almeida e Antônio Carlos Morais Souza pela colaboração, incentivo e apoio.

Aos Professores do PECE-POLI-USP por passar os grandes conceitos e conhecimentos necessários para minha vida profissional.

E a todos os colegas e amigos que, diretamente ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

“A vida é o trem e não a estação.”

Paulo Coelho

RESUMO

O presente trabalho traz uma análise dos diferentes tipos de sistemas de tração elétrica em corrente alternada monofásica para uso ferroviário, visto a implantação da futura rede de trens regionais pela CPTM no estado de São Paulo. Trata-se de uma tecnologia ainda não utilizada no Brasil, apesar de ter havido tentativas de sua implantação no passado.

Será feita uma análise de comparação entre as subestações de tração em corrente contínua em 3.000 Vcc utilizada pela CPTM com a subestação em corrente alternada proposta para as alimentações elétrica de tração dos trens regionais.

A intenção é, ao concluir este trabalho, apresentar dados contundentes para a aplicação do sistema de tração em corrente alternada no Brasil, possibilitando a viabilidade do projeto dos Trens Regionais do ponto de vista de seu sistema de eletrificação.

PALAVRAS-CHAVES: Ferrovia. Eletrificação. Corrente alternada monofásica.

ABSTRACT

This paper presents an analysis of different types of electric traction systems for electric railways using alternating current (AC), for the implementation of the future network of regional trains for CPTM in São Paulo, Brazil. It is a technology not yet used in Brazil, although there were attempts of its implementation in the past.

A comparative analysis will be performed between the traction substations in direct current in 3.000 Vcc used by CPTM with the substation into alternating current proposal for the electric traction feeds of regional trains.

The intention is when complete this work, presenting compelling data for the application of the drive system into alternating current in Brazil, enabling the viability of the project of the Regional Trains from the point of view of its electrification system.

KEY-WORDS: Railway. Regional. Eletrification. Single-phase AC

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama esquemático de um retificador de potência de uma subestação de tração em corrente contínua (TERANISHI, 2004).	19
Figura 2 – Configuração elétrica de alimentação de duas subestações de tração em corrente contínua alimentando um trem. (FOLGADO, 2015)	19
Figura 3 - Componentes de uma subestação de tração em CC. (SIEMENS)	20
Figura 4 - Transformador Principal.....	21
Figura 5 - Transformador de Potência e Transformador de Corrente (TP e TC).....	21
Figura 6 - Transformadores Auxiliares.	22
Figura 7 - Disjuntor de Proteção – 3 kVcc.....	23
Figura 8 - Chaves seccionadora de saída de linha para 3 kVcc.....	23
Figura 9 - Banco de Baterias.....	24
Figura 10 - Retificadores.	24
Figura 11 - Filtros Ressonantes.	25
Figura 12 - Painel de Comando.....	26
Figura 13 - Ondulador.	26
Figura 14 - Subestação rebaixadora em 25 kVca. (FOLGADO, 2015).....	27
Figura 15 - Esquema elétrico do princípio de alimentação monofásica. (FOLGADO, 2015)	28
Figura 16 - Esquema elétrico do princípio de alimentação bifásica. (FOLGADO, 2015)	29
Figura 17 - Conexão do sistema de tração CA monofásico ciclicamente alternado. (KIESSLING, PUSCHMANN, <i>et al.</i> , 2009)	30
Figura 18 - Conexão do sistema de tração CA monofásico sem compensação para desequilíbrio. (KIESSLING, PUSCHMANN, <i>et al.</i> , 2009)	30
Figura 19 - Outros exemplos de conexões do sistema CA monofásico ao sistema de transmissão trifásico. (KIESSLING, PUSCHMANN, <i>et al.</i> , 2009).....	31
Figura 20 - Esquema elétrico do princípio de alimentação trifásica. (FOLGADO, 2015)	32
Figura 21 - Componentes de uma subestação de tração em CA. (SIEMENS)	33
Figura 22 – Chave Comutadora de Alta Tensão. (RAIELECTRICA).....	34
Figura 23 - Transformador de Tração. (RAIELECTRICA)	34
Figura 24 - Painel de comando da subestação de tração. (SIEMENS).....	35

Figura 25 - Chave seccionadora de saída da subestação para a rede aérea de tração. (MARINO, 2015).....	36
Figura 26 - Pantógrafo do trem em contato com o fio de contato da rede aérea de tração. (TERANISHI, 2010).....	37
Figura 27 - Rede aérea de tração autocompensada em 3 kVcc.	37
Figura 28 - Rede aérea de tração autocompensada em 1x25 kVca.	38
Figura 29 - Vista isométrica e indicação de equipamentos usados na rede aérea de tração. (FOLGADO, 2015)	38
Figura 30 - Esquema de seccionamento elétrico da rede aérea de tração em CC. (CONSÓRCIO ENERGIA ESMERALDA, 2013).....	39
Figura 31 - Esquema de seccionamento elétrico da rede aérea de tração em CA. (MINISTRY OF RAILWAYS - GOVERNMENT OF INDIA, 2010)	40
Figura 32 - Chave seccionadora para uso na rede aérea de tração em 3 kVcc. (SIEMENS AG, 2014).....	41
Figura 33 - Chave seccionadora para uso na rede aérea de tração em 25 kVca.....	41
Figura 34 - Configurações de zona neutra. (KIESSLING, PUSCHMANN, <i>et al.</i> , 2009).	42
Figura 35 - Vista em planta de uma ZN. (MINISTRY OF RAILWAYS - GOVERNMENT OF INDIA, 2010).....	43
Figura 36 - Zona Neutra de Caxarias. Linha do Norte, Portugal.	43
Figura 37 - Zona Neutra curta. (Trade India PPS International - PTFE Short Neutral Section, 2015)	44
Figura 38 – Zona Neutra curta.	44
Figura 39 - Trem em CA fabricado pela Alstom para o Metrô de Chennai, Índia.	46
Figura 40 - Trem em CC fabricado pela Hyundai Rotem para a CPTM, Brasil.	46

LISTA TABELAS

Tabela 1 - Lista de equipamentos presentes em uma subestação CC. (SIEMENS).	20
Tabela 2 - Lista de equipamentos presentes em uma subestação CA. (SIEMENS).	33
Tabela 3 - Especificações do fio de contato e cabo mensageiro para rede aérea em CC e CA. (MINISTRY OF RAILWAYS - GOVERNMENT OF INDIA, 2010)	39
Tabela 4 - Custo de aquisição do material rodante CC e CA.	46
Tabela 5 - Quadro resumo de custos de implantação de uma linha hipotética em CC e CA.	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATC	Automatic Train Control
ATO	Automatic Train Operation
CA	Corrente Alternada
CBTC	Communications Based Train Control
CBTU	Companhia Brasileira de Trens Urbanos
CC	Corrente Contínua
CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
d.d.p.	Diferença de Potencial
Feeder	Cabo de Reforço
FEPASA	Ferrovias Paulista S/A
GAP	Espaçamento
H1, H2, H3	Entrada do transformador de potência 1, 2 & 3
MVA	Mega Volt - Ampère
R-S-T	Rede de Sistema Trifásico
SF6	Hexafluoreto de Enxofre
T1, T2, T3	Transformadores de Potência 1, 2 & 3
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
X1, X2, X3	Saída do transformador de potência em delta 1, 2 & 3
Y1, Y2, Y3	Saída do transformador de potência em estrela 1, 2 & 3
ZN	Zona Neutra

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampére
D	Comprimento da Zona Neutra
kgf	quilograma força
kgf/mm^2	quilograma força por milímetro quadrado
km	quilômetro
km/h	quilômetro por hora
kV	Quilovolt
$kVca$	Quilovolts em corrente alternada
$kVcc$	Quilovolt em corrente continua
L	Distância entre o eixo dos pantógrafos extremos do trem
mm	milímetro
mm^2	milímetro quadrado
S''_k	Potência de curto-circuito
S_e	Potência de tração
u_u	Tensão de desequilíbrio entre fases
V	Volts
Vca	Tensão elétrica em corrente alternada
Vcc	Tensão elétrica em corrente continua
V_d	Tensão direta
V_i	Tensão inversa
$\Omega \cdot m$	Ohm metro

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
1. SUBESTAÇÃO DE TRAÇÃO	18
1.1. Definição de subestação.....	18
1.2. Subestação em Corrente Contínua (CC)	18
1.2.1. DISPOSIÇÃO ELÉTRICA DE UMA SUBESTAÇÃO DE TRAÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA (CC).....	18
1.2.2. EQUIPAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO DE TRAÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA	20
1.3. Subestação de tração em corrente alternada (CA).....	26
1.3.1. DEFINIÇÃO DA SUBESTAÇÃO DE TRAÇÃO EM CORRENTE ALTERNADA (CA)	26
1.3.2. DESCRIÇÃO ELÉTRICA DE SUBESTAÇÕES DE TRAÇÃO EM CORRENTE ALTERNADA (CA).....	27
1.3.3. EQUIPAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO DE TRAÇÃO EM CORRENTE ALTERNADA (CA)	32
2. REDE AÉREA DE TRAÇÃO	37
2.1. Conceito da rede aérea de tração	37
2.2. Configuração da rede aérea de tração autocompensada.....	38
2.3. Equipamentos utilizados na rede aérea de tração CA.....	39
2.3.1. SECCIONAMENTO	39
2.3.2. CHAVE SECCIONADORA.....	40
2.3.3. ZONA NEUTRA	41
3. CUSTO COMPARATIVO DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA COM TRAÇÃO ELÉTRICA EM CC E CA	45
3.1. Custo de implantação do sistema subestação de tração.....	45
3.2. Custo de implantação do sistema rede aérea de tração.....	45
3.3. Custo de aquisição do material rodante.....	45
3.4. Custo de construção de uma linha hipotética	47
3.4.1. CONSIDERAÇÕES	47
4. CONCLUSÃO	49

INTRODUÇÃO

Esta pesquisa pretende mostrar o comparativo entre o sistema de alimentação elétrica de tração tanto da subestação como da rede aérea para os Trens Regionais que serão utilizados para interligar a cidade de São Paulo capital ao interior do estado de São Paulo nas cidades de Sorocaba, Santos e Jundiaí.

A Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) é responsável pela operação e manutenção de uma malha ferroviária de 257,5 quilômetros espalhados em 22 municípios do Estado de São Paulo, 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) até o ano de 1994. (CPTM, 2016)

Usualmente o sistema de tração adotado pela Companhia Paulista de Trens Metropolitanos é um sistema elétrico em corrente contínua de 3.000 Vcc herdado das antigas empresas que operavam o sistema de transporte.

Nas seis linhas em que a Companhia Paulista de Trens Metropolitanos opera e executa a manutenção preventiva e corretiva o sistema de instalação fixa é composto por rede aérea de tração fixa e autocompensada no qual é mesclada devido as constantes remodelações que o sistema sofreu durante os últimos anos.

Com os trens regionais para o interior do estado de São Paulo a Companhia Paulista de Trens Metropolitanos irá seguir um novo parâmetro para a sua operação comercial e manutenção do transporte de passageiros sobre trilho, proporcionando maior conforto, agilidade e tecnologia de modo a interligar esses grandes centros urbanos a capital paulista de forma rápida e eficaz a grande demanda do estado de São Paulo.

Essas novas linhas serão contempladas com o mais recente sistema de sinalização encontrado no mercado o Controle de trens baseado em comunicação ou mais conhecido pela sigla em inglês CBTC (Communications-Based Train Control), no qual é um sistema de controle e sinalização ferroviária que faz uso de comunicações bidirecionais entre o equipamento do trem e o equipamento na via para gerenciar o tráfego ferroviário. A posição exata de um trem é conhecida com maior precisão que nos sistemas de controle tradicionais

como ATO (Automatic Train Operation) e ATC (Automatic Train Control) e com isso dita gestão do tráfego ferroviário de uma forma mais eficiente e segura. (SULLIVAN, 2015)

A via permanente contará com a bitola padrão ou bitola universal de 1.435 mm; hoje, as atuais linhas de alta velocidade em toda a Europa adotaram esta bitola.

A alimentação elétrica de tração será em corrente alternada, a qual será o estudo realizado nesse trabalho, onde será feito um comparativo com o sistema elétrico de corrente contínua em 3.000 V atualmente em uso na malha da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos.

1. SUBESTAÇÃO DE TRAÇÃO

Neste capítulo, será apresentada uma comparação entre uma subestação de tração em corrente contínua e uma subestação de tração em corrente alternada. Essa comparação se faz necessária para demonstração da quantidade de área e de equipamentos necessários para sua instalação, com o intuito de subsidiar os custos de implantação deste subsistema.

1.1. Definição de subestação

As subestações de tração compõem um subsistema que tem como finalidade a transformação da energia elétrica fornecida pelas concessionárias em corrente alternada de alta tensão em níveis adequados para sua utilização na tração dos trens elétricos.

São divididas em dois tipos: subestação de tração em corrente contínua ou em corrente alternada.

Os sistemas de alimentação elétrica em corrente contínua são projetados para funcionarem com valores de tensão de 600 Vcc até 3 kVcc.

Já os sistemas de alimentação elétrica em corrente alternada são projetados para funcionarem com valores de tensão de 15 kVca até 50 kVca, adotando-se frequências de $16\frac{2}{3}$ Hz, 50 Hz ou 60 Hz.

1.2. Subestação em Corrente Contínua (CC)

São instaladas ao longo das linhas férreas e recebem uma tensão elétrica da concessionária em 88/138 kV e rebaixam essa tensão retificando-a para 3 kVcc enviando-a à rede aérea de tração para alimentação dos trens.

1.2.1. DISPOSIÇÃO ELÉTRICA DE UMA SUBESTAÇÃO DE TRAÇÃO EM CORRENTE CONTINUA (CC)

Como todo e qualquer circuito elétrico existem os polos positivo e negativo, os quais possuem as seguintes funções nas alimentações elétricas dos trens:

- POSITIVO (+) gerado através dos catodos após a transformação da tensão primária e da tensão secundária alternada, pelos retificadores através dos disjuntores de 3 kVcc;
- NEGATIVO (-) que é gerado pelos anodos dos retificadores das subestações de tração através dos trilhos aonde circulam os trens elétricos.

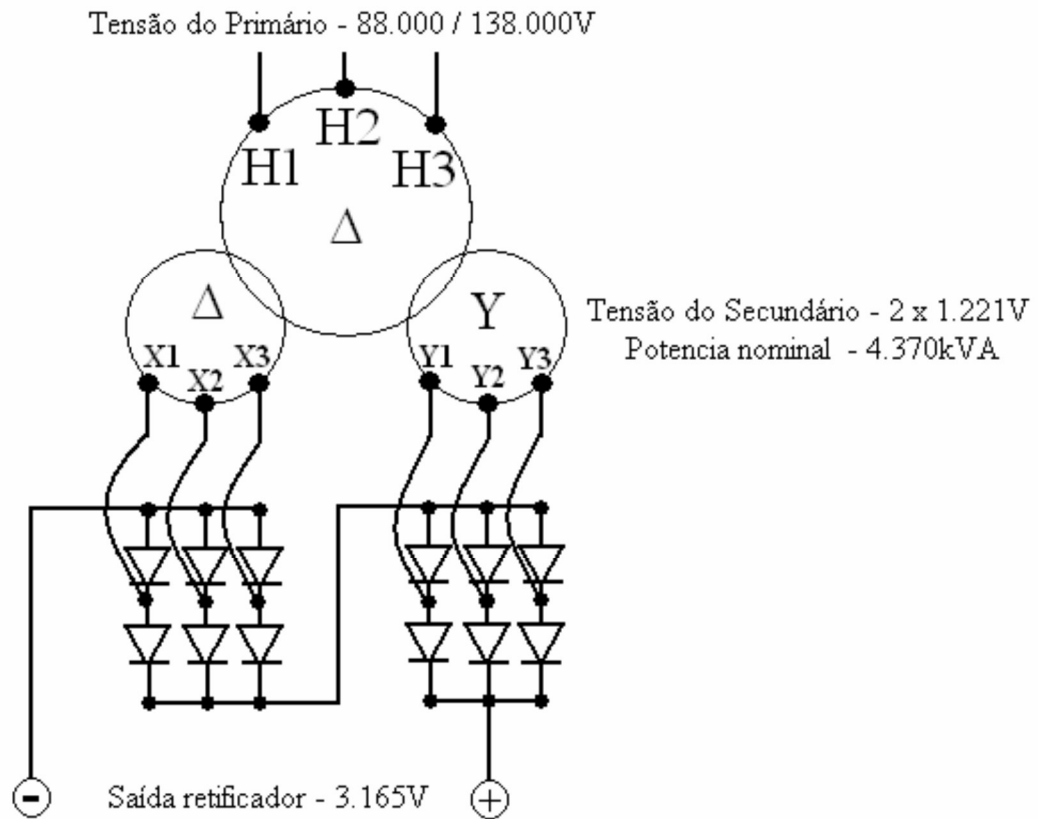


Figura 1 - Diagrama esquemático de um retificador de potência de uma subestação de tração em corrente contínua (TERANISHI, 2004).

O polo positivo dessa transformação é ligado na rede aérea de tração sem a necessidade de uma zona neutra entre as subestações de tração e suas adjacentes, pois o circuito contínuo não oferece diferenciais equipotenciais de fases pela ausência de frequência.

O polo negativo é conectado aos trilhos e ligado do começo ao fim da linha férrea aonde existe presença da rede aérea de tração para circulação de trens elétricos.

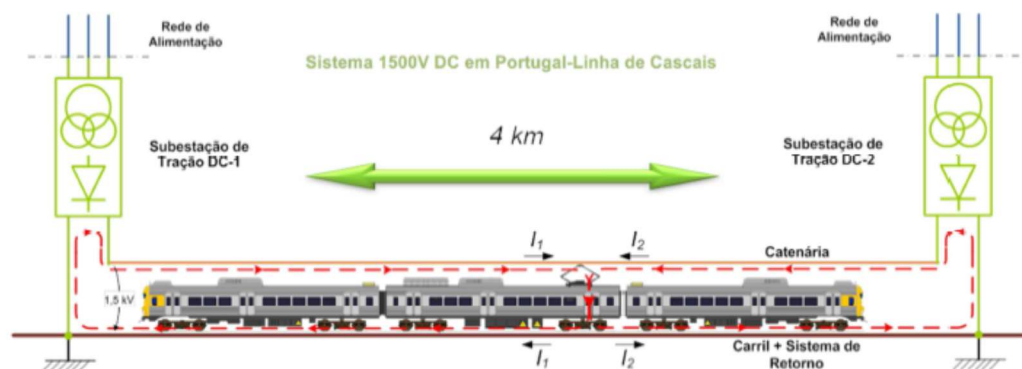


Figura 2 – Configuração elétrica de alimentação de duas subestações de tração em corrente contínua alimentando um trem. (FOLGADO, 2015)

1.2.2. EQUIPAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO DE TRAÇÃO EM CORRENTE CONTINUA

As subestações de tração em corrente contínua possuem equipamentos específicos para sua funcionalidade. Estes equipamentos estão mostrados na Figura 3 abaixo:

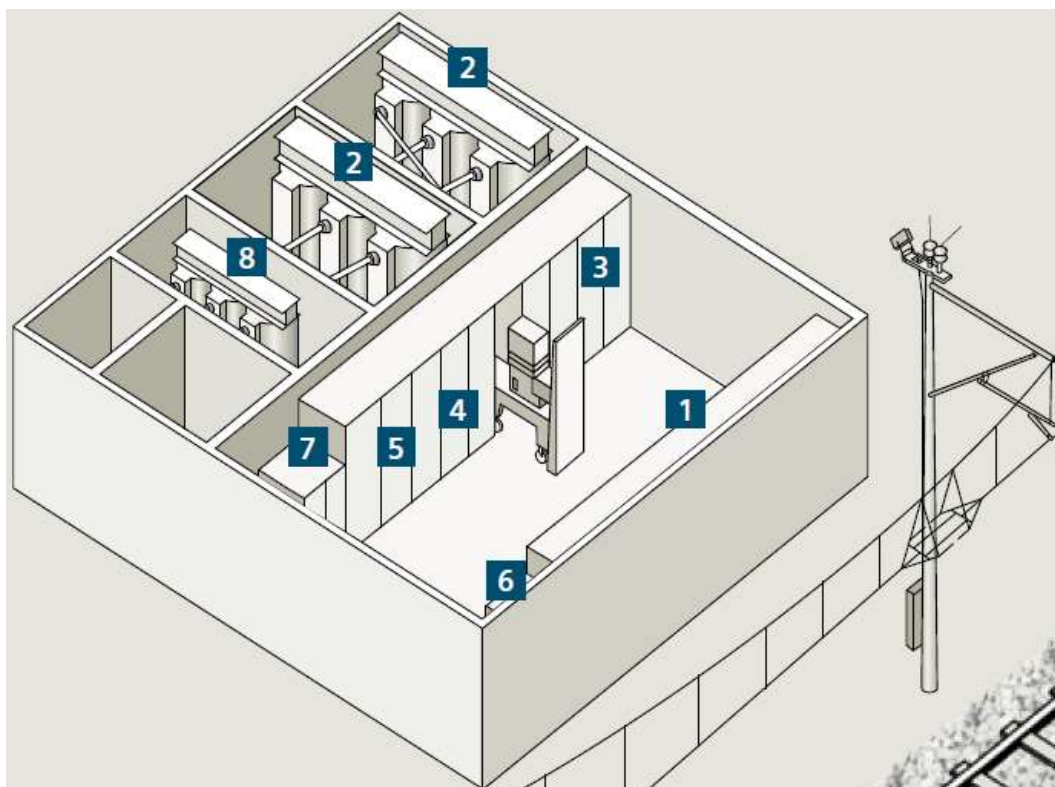


Figura 3 - Componentes de uma subestação de tração em CC. (SIEMENS)

ITEM	DESCRIÇÃO
1	Chaves seccionadoras de saída
2	Transformadores principais
3	Retificadores
4	Disjuntores 3 kVcc
5	Painel de controle
6	Painel relé fuga à terra
7	Sistemas de proteção contra curtos-circuitos
8	Transformadores auxiliares

Tabela 1 - Lista de equipamentos presentes em uma subestação CC. (SIEMENS)

No entanto, o esquema apresentado acima é uma simplificação. Na sequência serão apresentados equipamentos presentes nas subestações de tração em CC da CPTM, que não necessariamente fazem parte do mostrado na Figura 3.

- Transformadores Principais - São destinados a transformar a tensão alternada de 88/138 kVca fornecida pela concessionária em uma tensão alternada de

1.221 Vca para alimentação dos retificadores.



Figura 4 - Transformador Principal.

- Transformadores de Corrente e de Potencial (TP e TC) – São equipamentos destinados a reduzir a corrente e a tensão da entrada de linha em níveis compatíveis para alimentação dos painéis de medição e dos relés de proteção, os quais são os responsáveis pela abertura espontânea dos disjuntores de entrada protegendo a subestação de alguma anormalidade na entrada de energia.

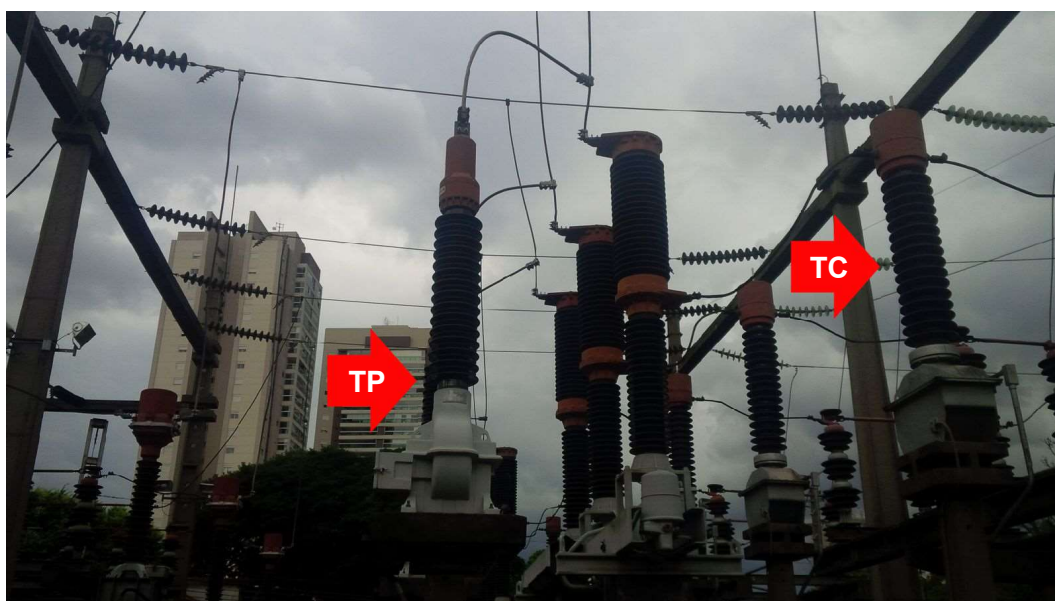


Figura 5 - Transformador de Potência e Transformador de Corrente (TP e TC).

- Transformadores Auxiliares – Estes equipamentos são conectados no secundário do transformador principal e se destinam a alimentar os sistemas auxiliares das subestações, tais como, carregador de baterias, iluminação,

tomadas e outros equipamentos necessários no auxílio da subestação de tração.

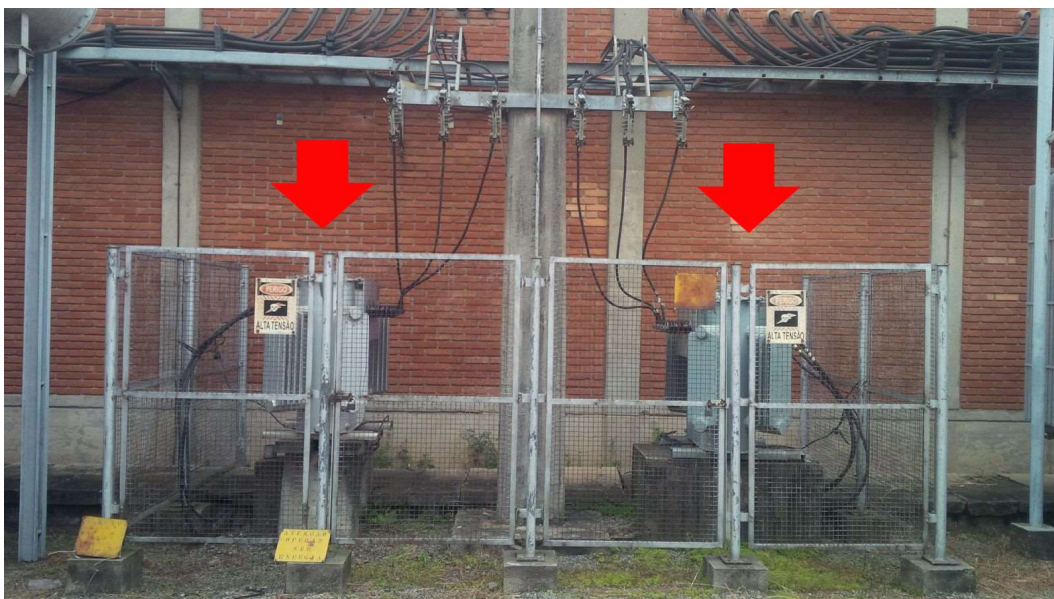


Figura 6 - Transformadores Auxiliares.

- Disjuntores - São dispositivos de proteção, contra eventuais sobrecargas nos circuitos de alimentação em corrente contínua (3 kVcc) ou alternada (88/138 kVca), atuando de forma a interromper esta alimentação. Possui uma abertura sincronizada e instantânea, sem que os contatos internos se danifiquem.

Os disjuntores de 88/138 kVca são dotados de câmara de extinção de arco voltaico que utiliza gás SF₆ (Hexafluoreto de Enxofre) como elemento de extinção.

Os disjuntores de 3 kVcc utilizam uma barreira com sopro magnético, podendo ser manobrados em carga em qualquer situação.



Figura 7 - Disjuntor de Proteção – 3 kVcc.

- Chaves Seccionadoras - São equipamentos corta circuitos, porém não possuem dispositivo de extinção de arco voltaico, não podendo ser manobrados em carga.

Nas subestações a principal finalidade das chaves seccionadoras, tanto na entrada da linha como na saída para a rede aérea de tração é a de isolar eletricamente os equipamentos.



Figura 8 - Chaves seccionadora de saída de linha para 3 kVcc.

- Banco de Baterias – É responsável pela alimentação elétrica de todos os sistemas vitais da subestação de tração na falta da alimentação em corrente alternada para as manobras elétricas necessárias de restabelecimento.



Figura 9 - Banco de Baterias.

- Retificadores - São equipamentos destinados a transformar tensão e corrente elétrica alternada em contínua.

Recebem uma tensão elétrica alternada entre fases de 1.221 Vca e a transforma em uma tensão contínua de aproximadamente de 3.300 Vcc (em vazio), para uma corrente nominal de 1.250 A.



Figura 10 - Retificadores.

- Filtros Ressonantes ou Filtro de Harmônicas - O conjunto de reatância de alisamento é composto pela indutância de cátodo “Self-Lissage” em ar, sem circuito magnético em cobre, cuja finalidade é de suavizar o chaveamento da condução de corrente dos diodos, e conseqüentemente fornecer um nível de tensão contínua mais estável. Além disso, possui uma associação de filtros

para manter o nível de harmônicos característicos gerados pelo sistema de retificação abaixo dos limites especificados pela concessionária de energia elétrica, ou seja, os harmônicos gerados na transformação da energia elétrica alternada para a energia elétrica em corrente contínua não característicos do sistema são suprimidos deixando a energia elétrica limpa de ruídos e interferências.



Figura 11 - Filtros Ressonantes.

- Fusíveis - São componentes importantes de sacrifício, com ampla utilização na proteção dos equipamentos a eles associados, podendo ser de alta ou baixa corrente e de classe de isolamento elétrica variada e adequada a sua aplicação.
- Painel de Comando - Constituem um conjunto de componentes de comando, sinalização e proteção, contendo botoeiras utilizadas para comando e sinalização local de todos os disjuntores e seccionadoras das subestações de tração.

Abrigam ainda os mostradores de supervisão e medição de tensão e corrente elétrica, os sinalizadores de alarmes, relés de proteção do sistema, supervisão geral do sistema da subestação, desarme emergencial e bloqueio do comando dos equipamentos.



Figura 12 - Painel de Comando.

- Ondulador - São equipamentos destinados a inverter o fluxo de potência, isto é, recebem potência gerada pela frenagem dos trens e a devolvem à concessionária.

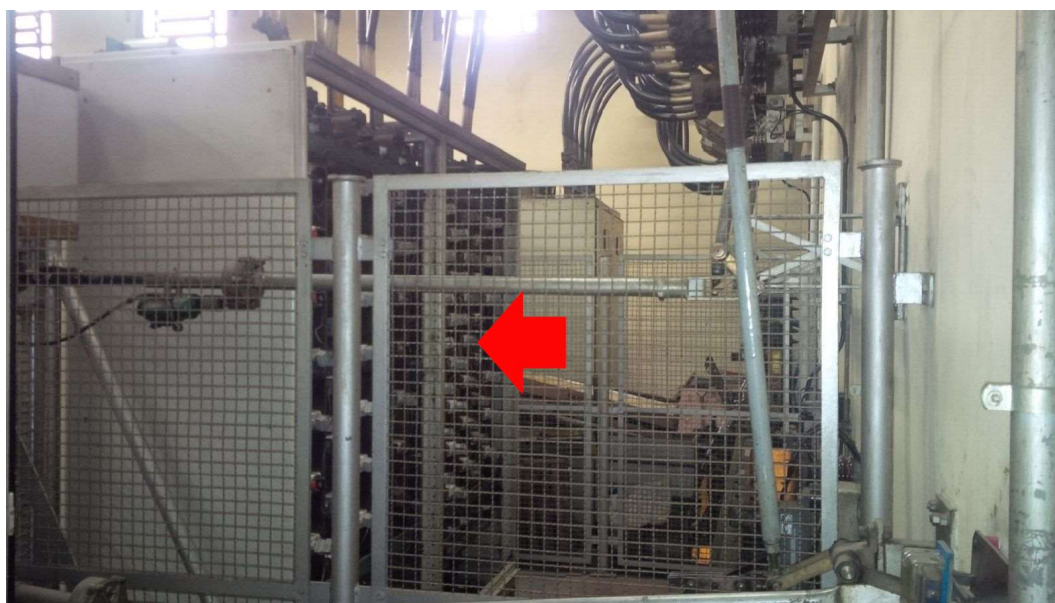


Figura 13 - Ondulador.

1.3. Subestação de tração em corrente alternada (CA)

1.3.1. DEFINIÇÃO DA SUBESTAÇÃO DE TRAÇÃO EM CORRENTE ALTERNADA (CA)

De maneira análoga à subestação de tração em CC, a subestação de tração em CA tem a função de transformar a energia elétrica fornecida pelas concessionárias, rebaixando-a para níveis de tensão apropriados para a alimentação elétrica dos trens.

Em função desta característica, são denominadas como subestações abaixadoras.

Os sistemas elétricos em corrente alternada são projetados para funcionarem com valores de tensão de 15 kVca em frequência especial ($16 \frac{2}{3}$ Hz) até 25 kVca em frequência industrial (50/60 Hz), foco deste trabalho.

São instaladas ao longo das linhas férreas, e basicamente rebaixam os níveis de tensão provenientes das concessionárias (88/138 kVca) para o nível de tensão desejado para realizar a alimentação dos trens.



Figura 14 - Subestação rebaixadora em 25 kVca. (FOLGADO, 2015)

1.3.2. DESCRIÇÃO ELÉTRICA DE SUBESTAÇÕES DE TRACÇÃO EM CORRENTE ALTERNADA (CA)

As descrições a seguir servem para ambos os tipos de eletrificação em corrente alternada de alta tensão de frequência industrial (1 x 25 kV e 2 x 25 kV). As únicas diferenças entre esses sistemas é a presença de um ponto médio no enrolamento secundário e tensão de saída de 50 kV no segundo caso.

a) Sistema de alimentação monofásica

Neste sistema, a subestação possui apenas 1 transformador monofásico de potência, onde o primário do mesmo é conectado à duas fases da rede de alimentação, apresentando no secundário uma tensão simples entre seus

terminais de 25 kV. Um dos terminais secundários é ligado à terra e aos trilhos, enquanto o outro terminal é conectado à rede aérea de tração. A Figura 15 mostra o explicado acima:

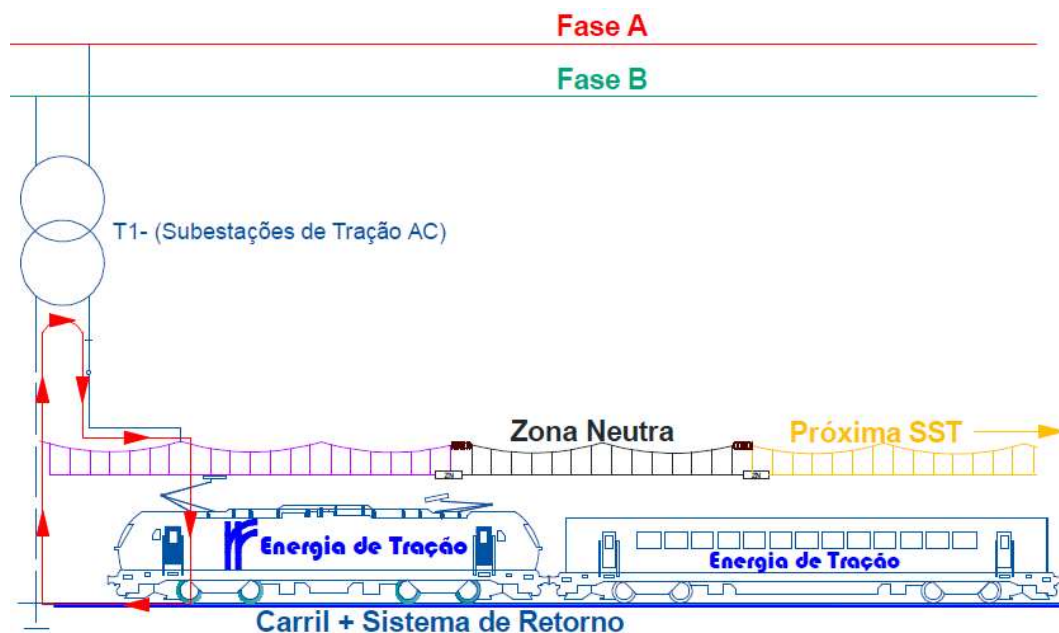


Figura 15 - Esquema elétrico do princípio de alimentação monofásica. (FOLGADO, 2015)

b) Sistema de alimentação bifásica

Este sistema é o mais adotado nos sistemas atuais de eletrificação em CA. Cada subestação possui dois transformadores de potência alimentados pelas mesmas fases, onde um deles está em funcionamento e o outro fica em reserva. Nesta configuração, não é necessária a existência de uma ZN junto à subestação para a separação de fases.

No caso do projeto da subestação prever o funcionamento de ambos os transformadores de potência em conjunto, exige-se a existência de uma ZN para a separação de fases. A Figura 16 mostra o explicado acima:

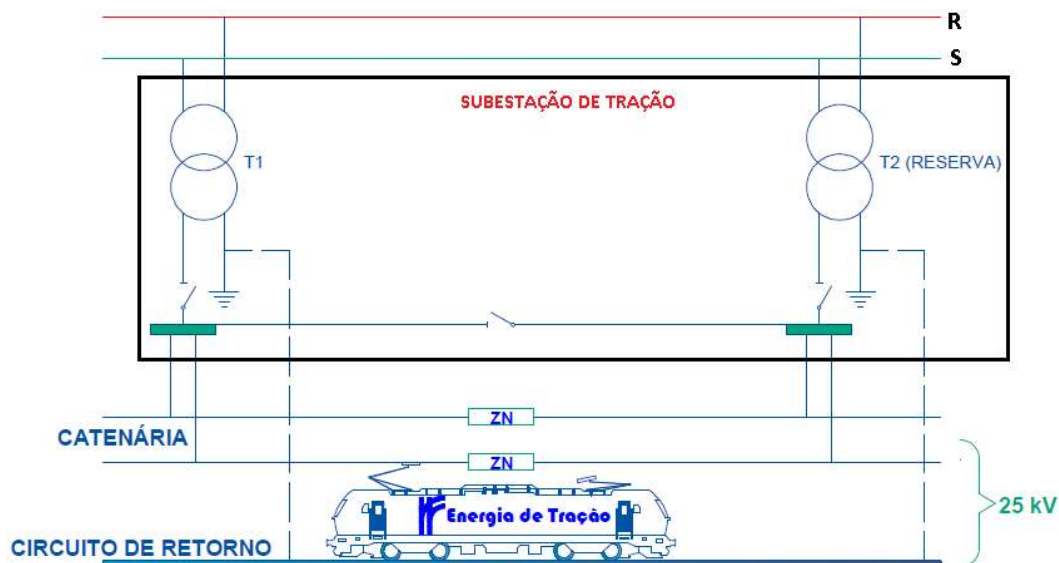


Figura 16 - Esquema elétrico do princípio de alimentação bifásica. (FOLGADO, 2015)

Esta configuração é a que provoca maiores desequilíbrios nas redes de alimentação trifásicas das concessionárias de energia. O desequilíbrio na corrente tem um efeito minoritário nos geradores, enquanto que o desequilíbrio de tensão tem efeitos graves sobre os consumidores.

A tensão de desequilíbrio u_U é a relação entre a tensão inversa V_1 e a tensão direta V_d . O desequilíbrio de tensão também é inversamente proporcional à potência de curto circuito S''_k da rede pública trifásica de transmissão. Se a potência de tração S_e a ser desenhada de uma fase da rede pública trifásica de transmissão é conhecida, então a tensão de desequilíbrio na rede pública trifásica de transmissão no ponto de fornecimento é determinada com precisão pela seguinte fórmula:

$$u_U = V_i/V_d \approx S_e/S''_k \quad (1)$$

Com uma potência de curto circuito que varia entre 700 MVA e 3.000 MVA na rede pública de transmissão trifásica e com subestações com potência da ordem de 40 MVA, são esperados altos valores de desequilíbrio de tensão (KIESSLING, PUSCHMANN, *et al.*, 2009). Para minimizar os efeitos desfavoráveis do desequilíbrio de tensão, são especificados os valores limites de u_U . De acordo com a norma EN 60034-1, motores trifásicos só podem ser operados em um sistema de fornecimento de energia que possuam 1% de desequilíbrio de tensão de forma contínua ou 1,5% por poucos minutos. Para cumprir estes requisitos rigorosos, há a necessidade de limitar ou compensar

estes desequilíbrios provenientes do sistema de tração elétrica.

Na prática, o sistema de tração elétrica em CA monofásica é usualmente conectado à rede pública de transmissão trifásica de forma ciclicamente alternada, conforme a Figura 17:

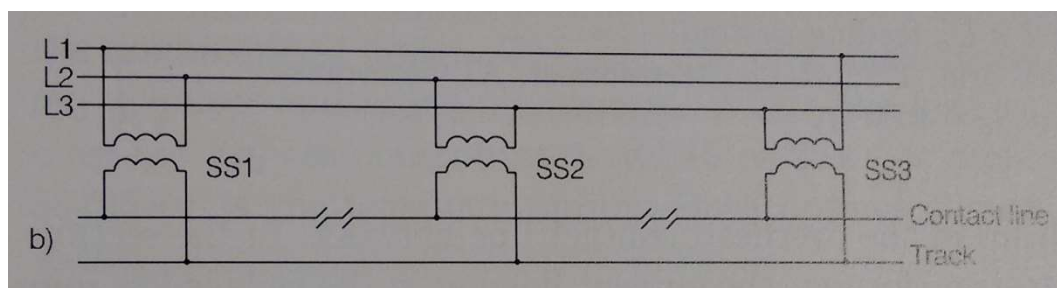


Figura 17 - Conexão do sistema de tração CA monofásico ciclicamente alternado. (KIESSLING, PUSCHMANN, *et al.*, 2009)

No entanto, este tipo de alimentação conduz a um compromisso no sistema de tração CA monofásico que diz respeito a uma ótima operação, o que seria o caso da conexão mostrada na Figura 18:

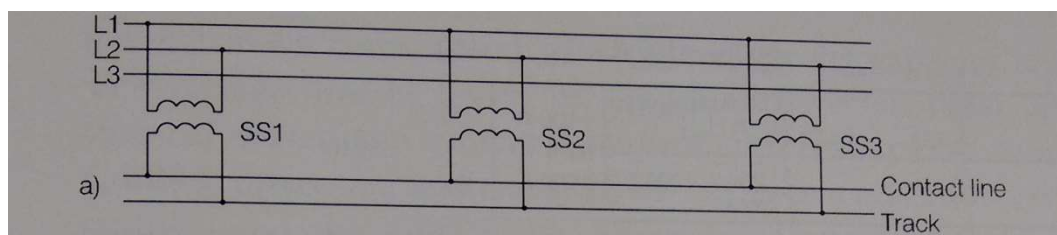


Figura 18 - Conexão do sistema de tração CA monofásico sem compensação para desequilíbrio. (KIESSLING, PUSCHMANN, *et al.*, 2009)

Separações de fase são necessárias para permitir a alimentação da linha de contato a partir de apenas um dos lados. As tensões aplicadas têm um deslocamento de fase de 120° . A diferença de tensão na separação de fases é igual à $\sqrt{3} \cdot 25kV \approx 43,3kV$. Altos valores de queda de tensão surgem na rede aérea de tração. Isto cria condições desfavoráveis para a frenagem elétrica regenerativa (KIESSLING, PUSCHMANN, *et al.*, 2009).

Na Rússia, onde mais de 24.500 quilômetros de vias férreas foram eletrificados no sistema CA monofásico em 25 kV 50 Hz, foram utilizadas conexões dos transformadores onde parcialmente corrigiram a assimetria. No entanto, as separações de fase são necessárias e podem ser instaladas nas proximidades das subestações. A operação em paralelo produz correntes compensatórias elevadas, sobre certas condições (KIESSLING, PUSCHMANN, *et al.*, 2009).

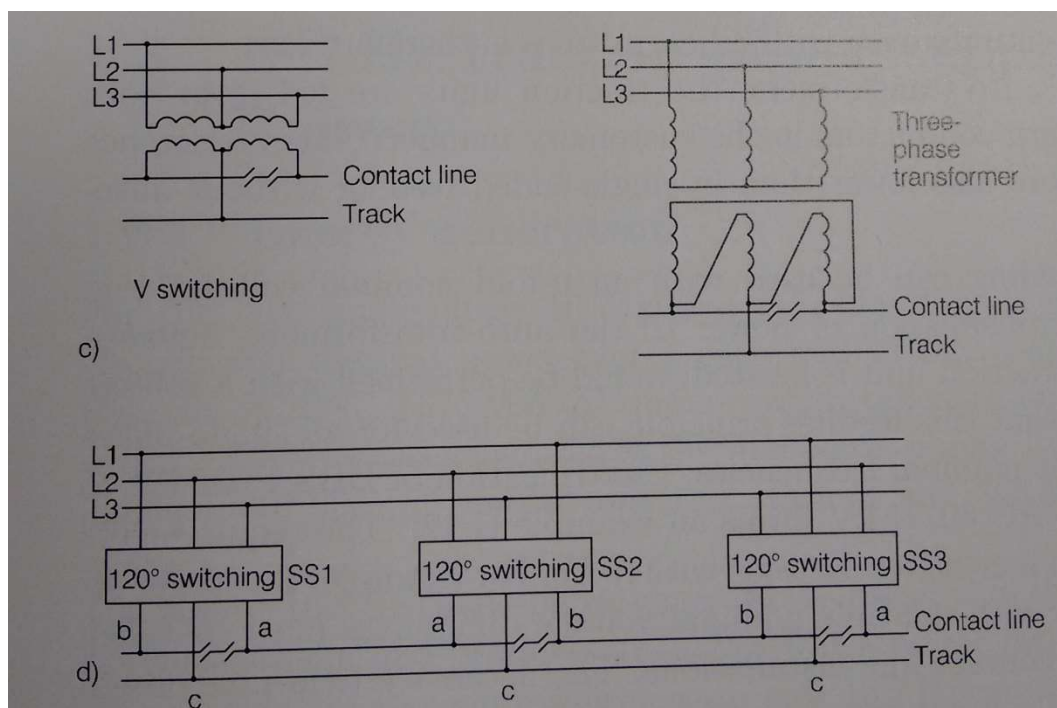


Figura 19 - Outros exemplos de conexões do sistema CA monofásico ao sistema de transmissão trifásico. (KIESSLING, PUSCHMANN, *et al.*, 2009)

c) Sistema de alimentação trifásica

Neste sistema, a subestação possui 3 transformadores monofásicos de potência, onde apenas dois funcionam ao mesmo tempo, ficando o terceiro em reserva, podendo substituir qualquer um dos outros dois.

Nesta configuração, cada transformador alimenta um tramo da rede aérea de tração podendo funcionar independentemente de o outro estar ou não em serviço. Neste caso é obrigatória a presença da ZN entre cada setor. Na Figura 20, além de mostrar a explicação acima, ilustra também o defasamento entre as tensões secundárias igual a 60° , o que equivale a uma d.d.p. de 25 kV entre elas.

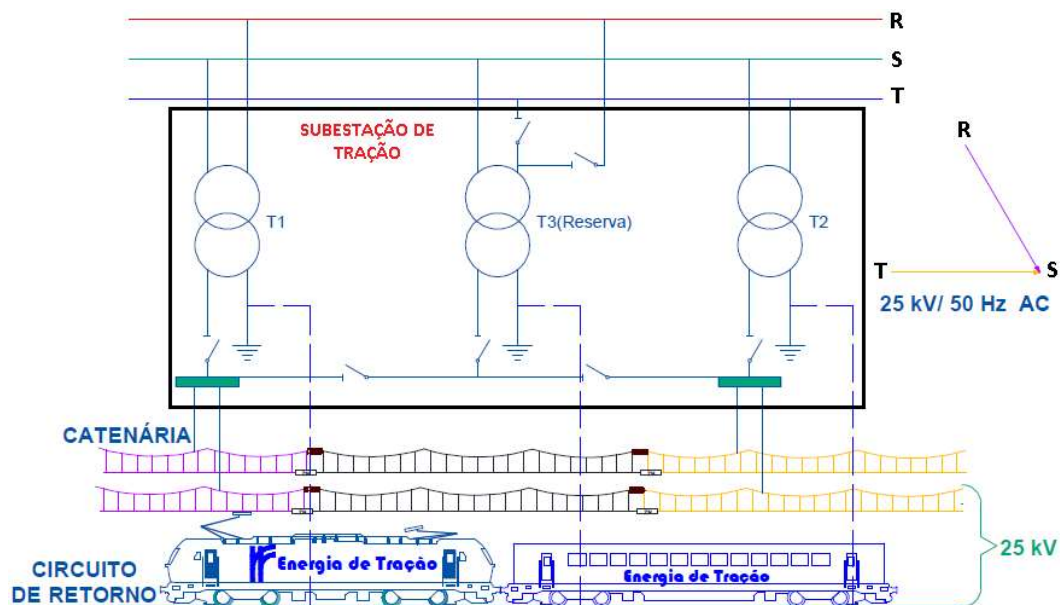


Figura 20 - Esquema elétrico do princípio de alimentação trifásica. (FOLGADO, 2015)

Nesta configuração, existe a possibilidade de operar como uma subestação monofásica, quando dois transformadores de potência estiverem desligados. No entanto, trata-se de uma situação especial, o que motivará a degradação do sistema como um todo, visto que a potência do transformador em funcionamento pode não ser a mesma requerida pela operação normal dos trens, levando à redução do número de trens circulantes com aumento de headway entre eles.

1.3.3. EQUIPAMENTOS DE UMA SUBESTAÇÃO DE TRACÇÃO EM CORRENTE ALTERNADA (CA)

As subestações de tração em corrente alternada são compostas por poucos elementos diferente das subestações de tração em corrente contínua. Na Figura 21 é apresentado um esquema que mostra os equipamentos existentes em uma subestação de tração em CA, além de sua disposição interna:

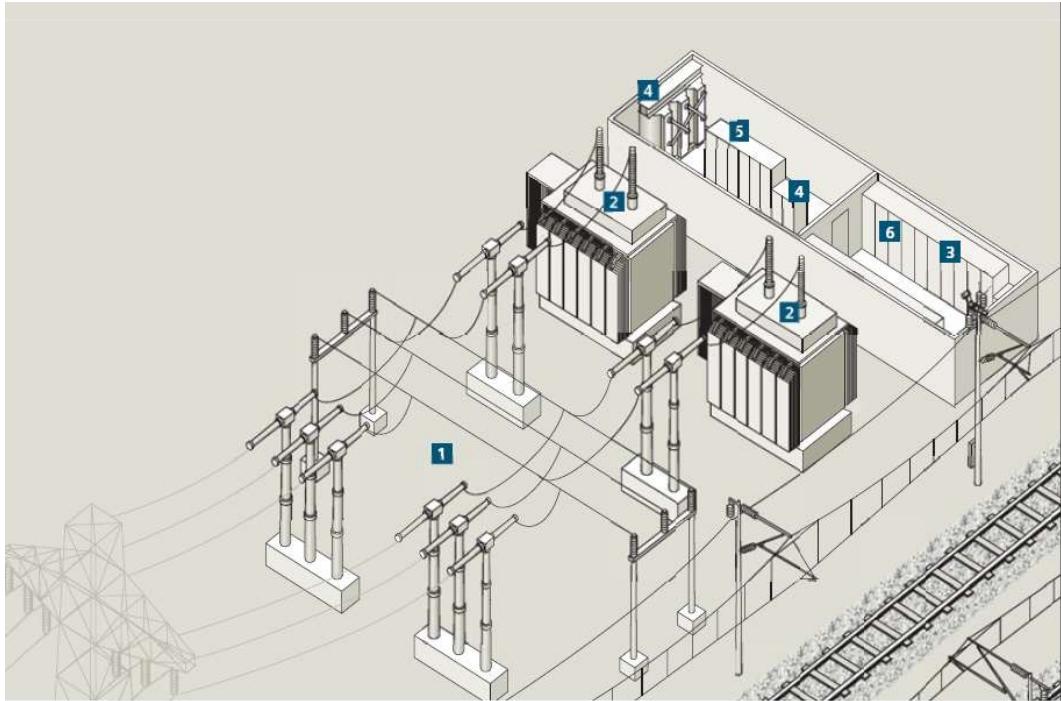


Figura 21 - Componentes de uma subestação de tração em CA. (SIEMENS)

ITEM	DESCRIÇÃO
1	Chave Comutadora de Alta Tensão
2	Transformadores de Potência
3	Chave Comutadora de Média Tensão
4	Sistema de Circuito Auxiliar
5	Painel de Controle
6	Sistema de Proteção

Tabela 2 - Lista de equipamentos presentes em uma subestação CA. (SIEMENS)

A seguir estão listados os equipamentos presentes nas subestações de tração em CA que diferem dos equipamentos presentes nas subestações de tração em CC.

- Chave Comutadora de Alta Tensão - São equipamentos corta circuitos, os quais protegem a subestação contra surtos provenientes da entrada de linha da concessionária de energia elétrica.



Figura 22 – Chave Comutadora de Alta Tensão. (RAIELECTRICA)

- Transformadores de Potência - São destinados a transformar a tensão alternada de entrada em 88/138 kVca fornecida pela concessionária em uma tensão alternada para a alimentação de tração elétrica com valor nominal de 25 kVca.



Figura 23 - Transformador de Tração. (RAIELECTRICA)

- Circuito Auxiliares – Estes equipamentos são conectados no secundário do transformador principal e se destinam a alimentar os sistemas auxiliares das subestações de maneira análogo à subestação de tração em CC.
- Painel de Comando - Constitui um conjunto de componentes que realizam o

comando de abertura e fechamento de diversos componentes da subestação, a sinalização da realização de comandos ou da atuação de relés de proteção e proteção, contendo painel computadorizado utilizado para comando e sinalização local de todos os disjuntores e seccionadoras das subestações de tração.



Figura 24 - Painel de comando da subestação de tração. (SIEMENS)

- Equipamentos de proteção – São equipamentos elétricos em painéis que monitora as funções vitais da subestação de tração e são destinados a proteger a entrada e saída dos transformadores de tração.
- Chaves seccionadoras – São responsáveis pelas aberturas e fechamento do circuito elétrico tanto interno a subestação como na saída para a rede aérea de tração.



Figura 25 - Chave seccionadora de saída da subestação para a rede aérea de tração. (MARINO, 2015)

2. REDE AÉREA DE TRACÇÃO

2.1. Conceito da rede aérea de tração

O sistema de rede aérea de tração é o sistema responsável pela transmissão de energia elétrica necessária à movimentação dos trens elétricos, sendo realizado pelo contato físico entre o fio de contato e o pantógrafo presente nos trens.

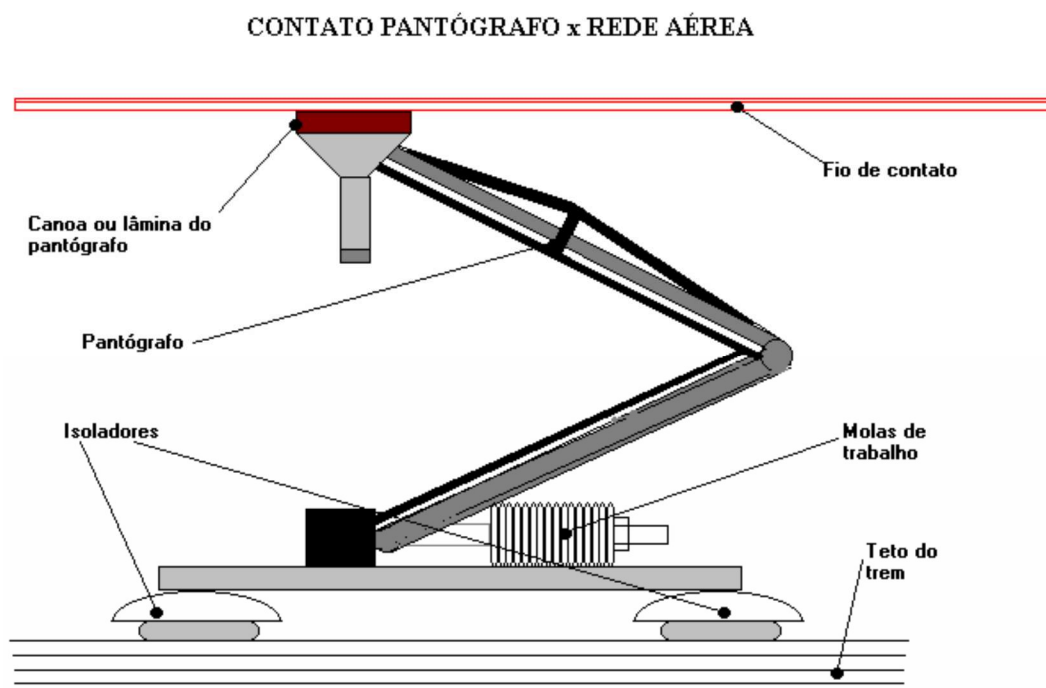


Figura 26 - Pantógrafo do trem em contato com o fio de contato da rede aérea de tração. (TERANISHI, 2010)



Figura 27 - Rede aérea de tração autocompensada em 3 kVcc.



Figura 28 - Rede aérea de tração autocompensada em 1x25 kVca.

2.2. Configuração da rede aérea de tração autocompensada

A rede aérea de tração possui os itens descritos na Figura 29 abaixo:

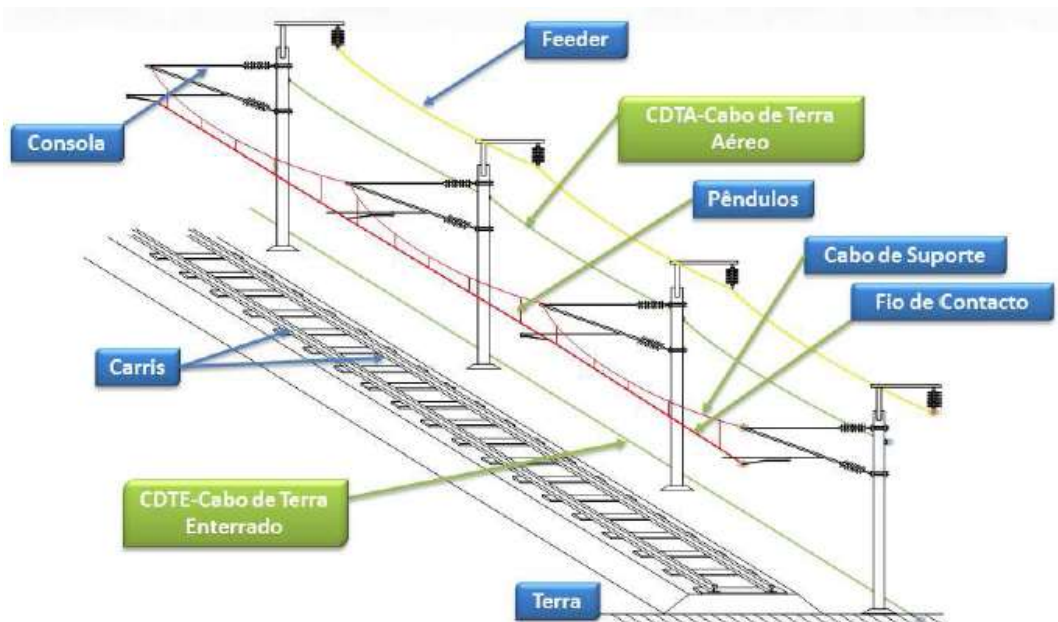


Figura 29 - Vista isométrica e indicação de equipamentos usados na rede aérea de tração. (FOLGADO, 2015)

Para o uso em sistemas CC e CA existem pequenas diferenças, listadas abaixo:

		UNIDADE	REDE AÉREA CC	REDE AÉREA CA
FIO DE CONTATO	MATERIAL		CuETP	CuAg 01 / CuMg 0,5
	SEÇÃO	mm ²	2 x 107	1 x 107
	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	kgf/mm ²	34	36,7 / 51,0
	TENSIONAMENTO	kgf	1.000@20°C	1.200@20°C
CABO MENSAGEIRO	MATERIAL		CuETP	Al
	SEÇÃO	mm ²	253,35	65
	TENTOS		37 c/ 6,79 mm ²	19 c/ 3,42 mm ²
	TENSIONAMENTO	kgf	2.000	1.000

Tabela 3 - Especificações do fio de contato e cabo mensageiro para rede aérea em CC e CA. (MINISTRY OF RAILWAYS - GOVERNMENT OF INDIA, 2010)

2.3. Equipamentos utilizados na rede aérea de tração CA

2.3.1. SECCIONAMENTO

As catenárias das vias principais são constituídas de “gaps” (ou overlaps) mecânicos e elétricos independentes entre si mecanicamente. A continuidade nos seccionamentos é garantida pela existência permanente de uma zona comum entre a superposição da catenária, zona em que as mesmas estão niveladas e locadas em planos paralelos, com a presença de uma chave seccionadora no “gap” denominado seccionamento elétrico, que permite a realização de manobras.

A diferença entre a rede aérea de tração CC da CA resume-se ao seccionamento elétrico. Na rede aérea de tração CC, a distância entre as catenárias é de 400 mm, conforme a Figura 30:

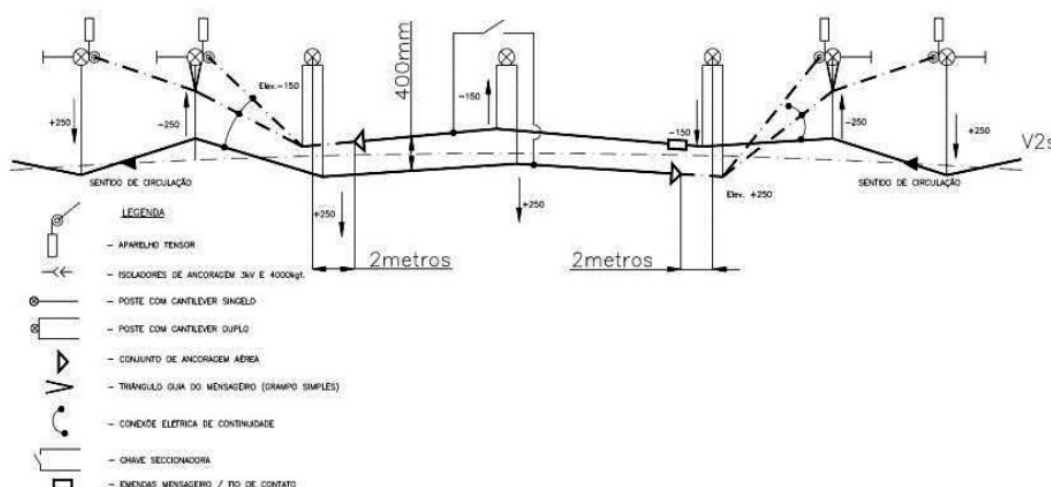


Figura 30 - Esquema de seccionamento elétrico da rede aérea de tração em CC. (CONSÓRCIO ENERGIA ESMERALDA, 2013)

Para a rede aérea de tração em CA, a distância entre as catenárias é igual à 500 mm, em função do maior nível de tensão presente, conforme ilustra a Figura 31:

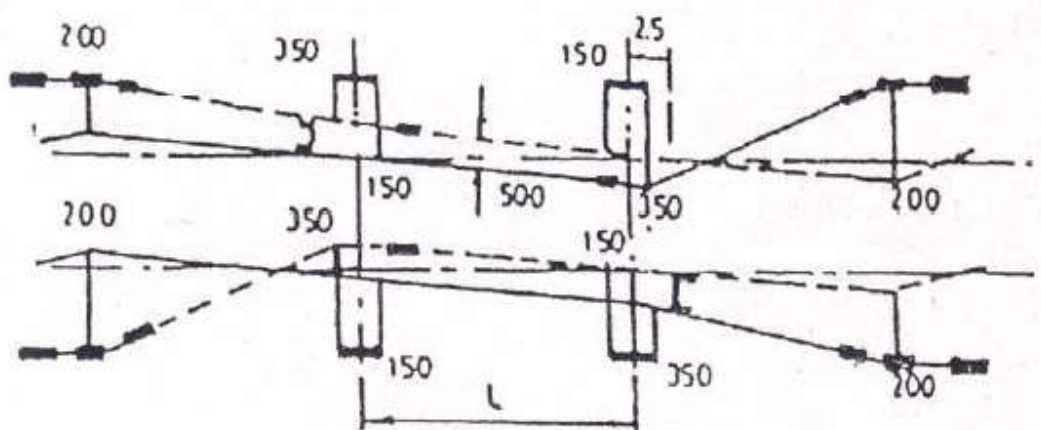


Figura 31 - Esquema de seccionamento elétrico da rede aérea de tração em CA. (MINISTRY OF RAILWAYS - GOVERNMENT OF INDIA, 2010)

2.3.2. CHAVE SECCIONADORA

As chaves seccionadoras são instaladas nos vão de seccionamentos elétricos e possibilitam a criação de rotas elétricas que auxiliam na manutenção do sistema elétrico ou na transposição elétrica em momentos de emergências ou necessidade operacional.

A diferença principal entre as chaves seccionadoras CC e CA residem no nível de isolamento das mesmas, e no caso da CA, ao adotar o uso do sistema 2 x 25 kV, existe a necessidade do uso de chaves seccionadoras bipolares.



Figura 32 - Chave seccionadora para uso na rede aérea de tração em 3 kVcc. (SIEMENS AG, 2014)

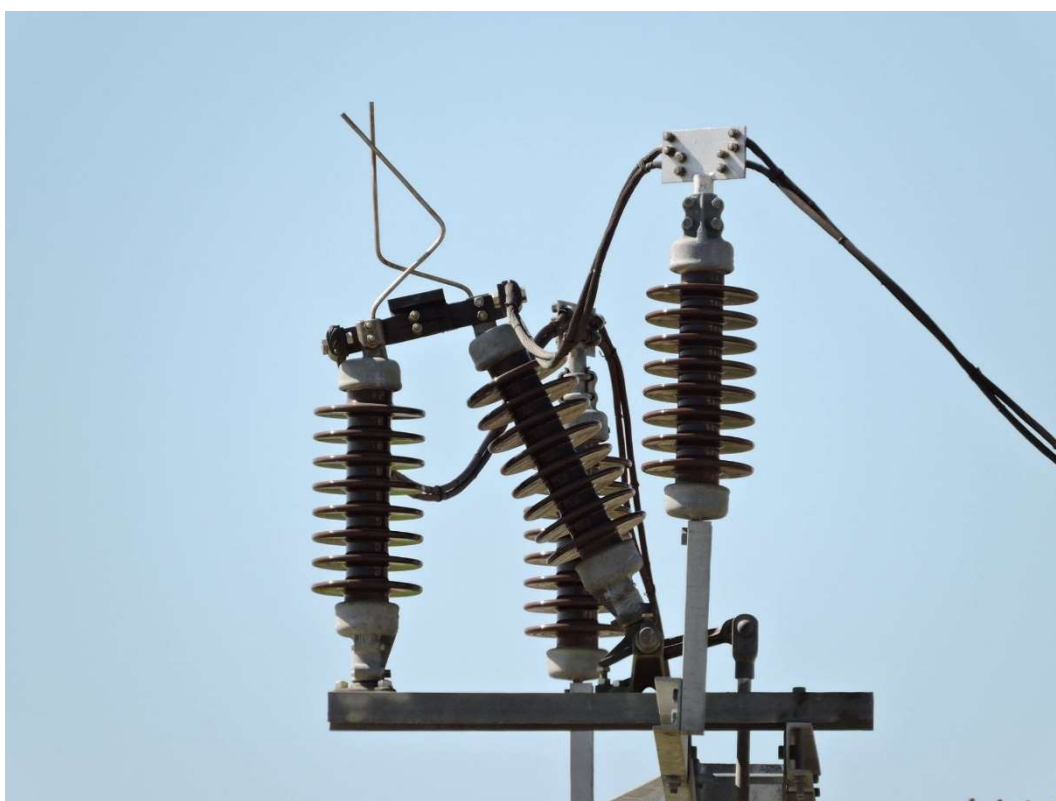


Figura 33 - Chave seccionadora para uso na rede aérea de tração em 25 kVca.

2.3.3. ZONA NEUTRA

Zonas neutras separam duas seções elétricas vizinhas da linha de contato, de modo que durante a passagem do pantógrafo não ocorra o “shunt” destas seções.

As zonas neutras são empregadas nas seguintes regiões fronteiriças:

- áreas com diferentes tipos de fontes de energia (por exemplo: entre uma linha alimentada em 3 kVcc e outra em 25 kV 50 Hz);
- seções alimentadas em fases diferentes (por exemplo: linhas de alimentação em 25 kV alimentadas diretamente da rede de distribuição em 188 kV; neste caso, a zona neutra também é denominada como zona de separação de fases);
- seções energizadas que possuem diferentes fases (por exemplo: um sistema de tração elétrica que é alimentado por estações conversoras descentralizadas).

Existem dois tipos de configuração de zonas neutra: aquelas em que o comprimento da zona neutra é projetado para ser menor do que a menor distância entre dois pantógrafos do material rodante ou aquelas em que o comprimento da zona neutra é projetado para ser maior do que a maior distância entre dois pantógrafos extremos do material rodante, conforme a Figura 34:

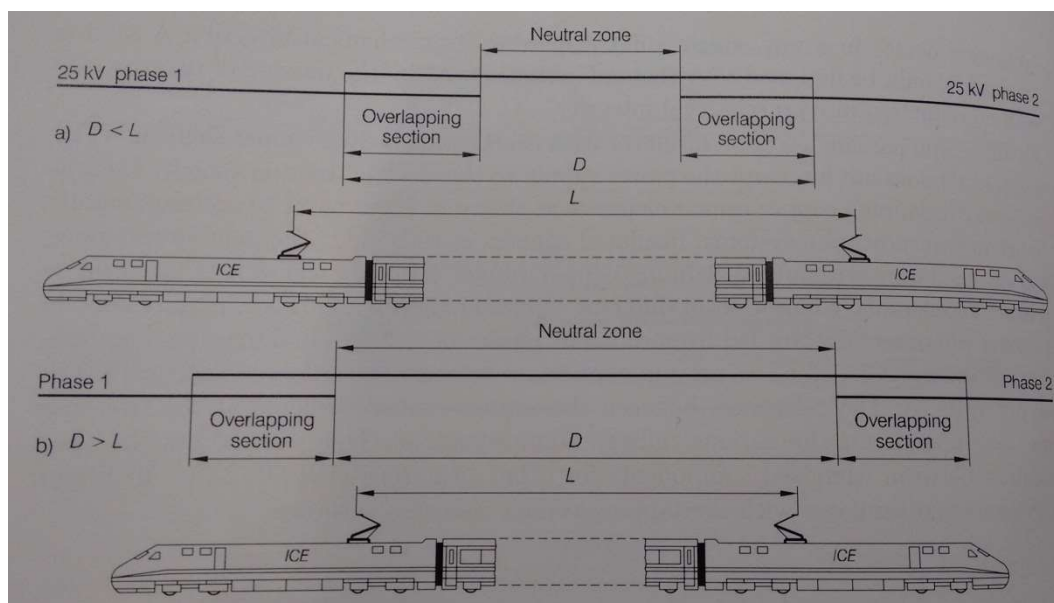


Figura 34 - Configurações de zona neutra. (KIESSLING, PUSCHMANN, *et al.*, 2009).

De acordo com as normas internacionais TSI Energy HS e EN 50367, existem alguns pontos que devem ser ressaltados, conforme segue:

- a separação de fases onde todos os pantógrafos do maior trem estão dentro da zona neutra ($D > L$). Neste caso, não há restrições no arranjo e espaçamento dos pantógrafos dos trens. Neste caso, o comprimento da zona neutra deverá ser de, no mínimo, 402 metros;

- a zona neutra com restrição no arranjo e distância dos pantógrafos do trem ($D < L$). Neste caso, o comprimento global é menor que 142 metros. Ao utilizar este design, há a necessidade de que a distância entre três pantógrafos consecutivos em serviço do trem seja maior que 143 metros.

Entretanto, a configuração ($D < L$) não é recomendada pela TSI Energy HS:2008. (TEAM, 2012).

Abaixo, segue a vista em planta de uma ZN:

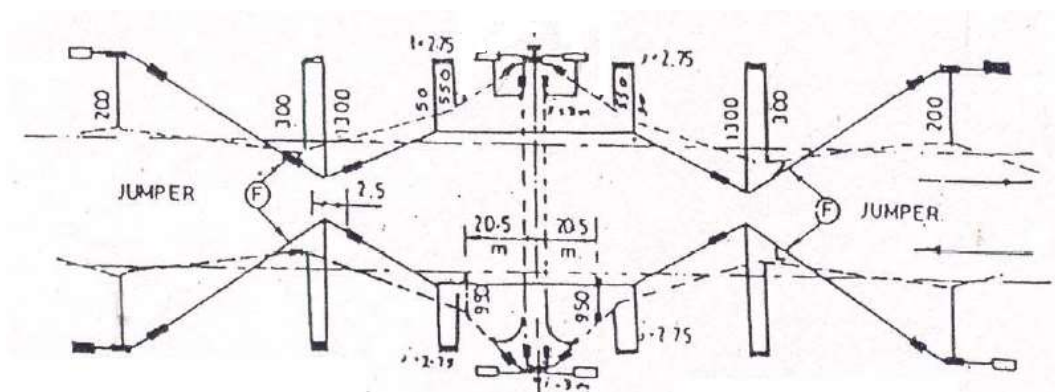


Figura 35 - Vista em planta de uma ZN. (MINISTRY OF RAILWAYS - GOVERNMENT OF INDIA, 2010)



Figura 36 - Zona Neutra de Caxarias. Linha do Norte, Portugal.

Outra configuração empregada em sistemas ferroviários cuja velocidade máxima é de até 160 km/h é a denominada “Zona Neutra Curta”. Essa configuração trata-se da montagem de dois isoladores de seção montados em

seqüência, tendo entre eles uma seção intermediária aterrada (KIESSLING, PUSCHMANN, *et al.*, 2009). Essa configuração pode ser vista na Figura 37:



Figura 37 - Zona Neutra curta. (Trade India PPS International - PTFE Short Neutral Section, 2015)

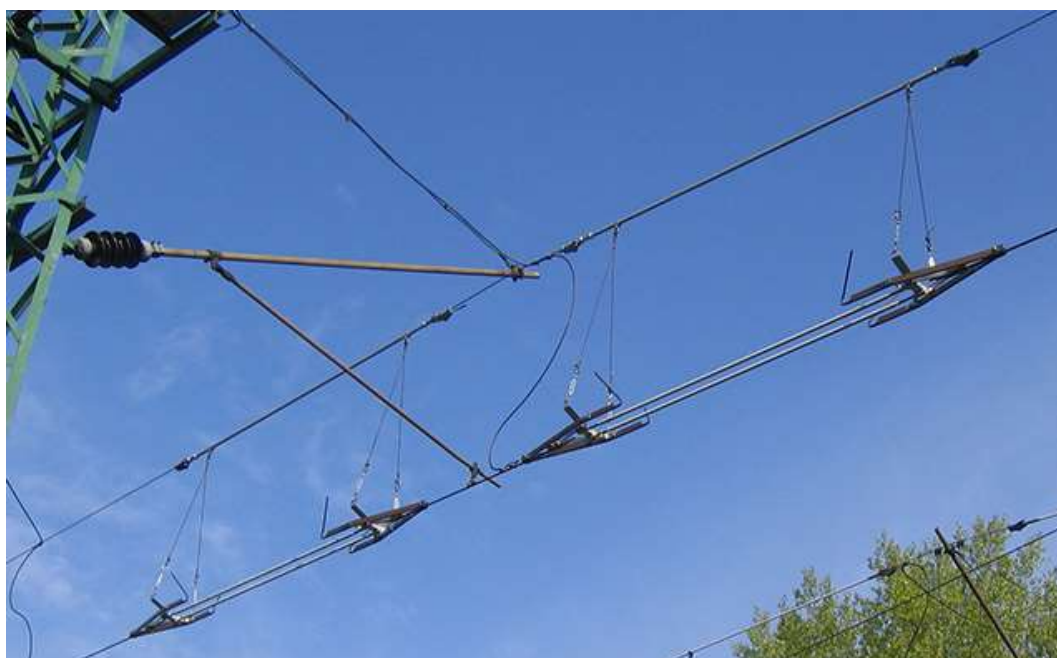


Figura 38 – Zona Neutra curta.

Em qualquer um dos casos, assume-se que durante a passagem do trem por uma zona neutra os pantógrafos não estão consumindo corrente, ou seja, o trem está com seu controle fechado. Essa medida é necessária, pois visa evitar a ocorrência de arcos quando da passagem dos trens pelas zonas neutras, o que poderia ocasionar a queda da rede aérea de tração.

3. CUSTO COMPARATIVO DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA COM TRAÇÃO ELÉTRICA EM CC E CA

3.1. Custo de implantação do sistema subestação de tração

Para a determinação do custo de implantação de uma subestação de tração CC e CA, determinou-se o custo médio por MVA a ser implantado, tendo como data base Janeiro/01 (BAUMGARTNER, 2001):

- Sistema CC em 3 kV: 3.000.000 EUR/MVA
- Sistema CA em 25 kV, 50/60 Hz: 2.000.000,00 EUR/MVA

3.2. Custo de implantação do sistema rede aérea de tração

A precificação do custo de implantação do sistema rede aérea de tração foi realizado com um levantamento junto à empresa BHT Engenharia LTDA. determinou-se os custos de implantação do sistema rede aérea de tração autocompensada em via singela, tendo como a data base 06/2013:

- Sistema CC (3 kVcc): R\$ 260.000,00/km
- Sistema CA (2 x 25 kVca): R\$ 310.000,00/km

3.3. Custo de aquisição do material rodante

Para a determinação dos custos de aquisição do material rodante, foram pesquisados os preços de fornecimento global de trens fornecidos para o metrô de Chennai, Índia em CA (ALSTOM, 2015).

Os custos referentes aos trens em CC adquiridos pela CPTM foram obtidos através de licitação pública internacional, que gerou o contrato nº 808513201100, referente à aquisição de 30 trens de 8 carros com o consórcio Hyundai Rotem/IESA.



Figura 39 - Trem em CA fabricado pela Alstom para o Metrô de Chennai, Índia.



Figura 40 - Trem em CC fabricado pela Hyundai Rotem para a CPTM, Brasil.

	TIPO	TENSÃO	QTDE TRENS	QTDE CARROS	CUSTO TOTAL	CUSTO POR TREM	CUSTO POR CARRO
Metrô Chennai	TUE	25 kVca	46	184	€ 243.000.000,00	€ 5.282.608,70	€ 1.320.652,17
CPTM Série 9500		3 kVcc	30	240	R\$ 788.199.216,09	R\$ 26.273.307,20	R\$ 3.284.163,40

Tabela 4 - Custo de aquisição do material rodante CC e CA.

3.4. Custo de construção de uma linha hipotética

Para a realização deste tópico, foi considerada a construção de uma linha hipotética, com as seguintes características:

- 42 quilômetros de extensão;
- Via dupla;
- Potência total instalada necessária: 40 MVA;
- Quantidade de trens necessários no carrossel: 22 trens de 8 carros

Para equalização dos cálculos, foi considerada a cotação do euro no dia 27/04/2016, onde: 1€ = R\$ 3,9895.

Será apresentado abaixo um quadro resumo desta linha hipotética sendo considerada sua eletrificação tanto em corrente contínua como em corrente alternada:

	SISTEMA CC	SISTEMA CA
SUBESTAÇÃO DE TRAÇÃO	R\$ 478.470.000,00	R\$ 319.160.000,00
REDE AÉREA DE TRAÇÃO	R\$ 21.840.000,00	R\$ 26.040.000,00
MATERIAL RODANTE	R\$ 578.012.758,40	R\$ 927.298.562,47
TOTAL	R\$ 1.078.322.758,40	R\$ 1.272.498.562,47

Tabela 5 - Quadro resumo de custos de implantação de uma linha hipotética em CC e CA.

3.4.1. CONSIDERAÇÕES

- Para o sistema subestação de tração não foram considerados os custos de aquisição de terrenos para sua implantação; sendo assim, em um sistema ferroviário em CC a quantidade de subestações instaladas é maior, pois a distância entre subestações neste sistema é da ordem de 4 quilômetros e no sistema 2 x 25 kVca essa distância é da ordem de até 60 quilômetros;
- Para o sistema rede aérea de tração, deve ser considerado a complexidade da mesma para o uso do sistema 2 x 25 kVca, conforme explicado no item 2;
- Para o material rodante, devem ser consideradas pequenas diferenças entre os trens, como, por exemplo, a presença de um carro motor de 1ª classe no metrô de

Chennai, Índia, inexistente nos trens da CPTM, Brasil. Além disso, no trem em CA é necessária a presença de um transformador abaixador, de forma a obter-se a bordo do trem um nível de tensão que permita a alimentação de seus motores de tração.

4. CONCLUSÃO

Sobre o conceito de subestação de tração elétrica foi demonstrada a comparação da quantidade de equipamentos que são necessários para uma subestação de tração em corrente contínua com a quantidade de equipamentos necessários para uma subestação de tração em corrente alternada. Em uma subestação de tração em corrente alternada, as quantidades de equipamentos instalados são bem menores em relação às subestações de tração em corrente contínua, somado ao fato da simplicidade da mesma. Além disso, foi comentado sobre os diferentes tipos de configuração das subestações de tração em CA (monofásica, bifásica e trifásica).

Em relação à rede aérea de tração, o conceito adotado para sua montagem possui sutis diferenças entre os sistemas CC e CA. As diferenças principais residem no nível de isolamento requerida, no aumento do gabarito decorrente do maior nível de tensão e nos elementos adicionais no sistema CA, como a Zona Neutra (que leva a uma utilização maior de isoladores de seção), as chaves seccionadoras (principalmente no sistema 2 x 25 kVca) e a configuração do “gap” elétrico no que tange à distância entre os tramos.

Por fim, foram apresentados os custos de instalação de um sistema CC e de um sistema CA (subestação, rede aérea e material rodante). Apesar de, inicialmente, o sistema CA apresentar um custo maior de implantação em comparação ao sistema CC, não foram considerados alguns pontos, conforme citado no texto, que podem modificar o cenário e tornar o sistema CA mais barato. Assim, esse é um ponto crucial que merece atenção, pois estes custos podem viabilizar ou não a eletrificação em CA.

Ao final, as informações descritas são preciosas fontes para o desenvolvimento de estudos visando à implantação desta tecnologia em nosso país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACERVO TÉCNICO DA CPTM. **Centro de Documentação da CPTM**. Osasco / SP. 2014.

ALSTOM. Alstom to provide 168 cars for Chennai's metro for 243 million euros. **Alstom**, 2015. Disponível em: <<http://www.alstom.com/press-centre/2010/9/alstom-to-provide-168-cars-for-chennais-metro-for-243-million-approx-lnr-1470-crore/>>. Acesso em: 10 maio 2016.

BAUMGARTNER, J. P. **Prices And Costs In The Railway Sector**. Lausanne: École Polytechnique Federale de Lausanne, 2001.

CONSÓRCIO ENERGIA ESMERALDA. **Treinamento de Rede Aérea de Tração Auto Compensada**. São Paulo: [s.n.], 2013.

CPTM. Companhia Paulista de Trens Metropolitanos. **CPTM**, 17 fev. 2016. Disponível em: <<http://www.cptm.sp.gov.br>>. Acesso em: 01 Fevereiro 2016.

FOLGADO, M. Â. S. **Subestações de Tração e Postos de Catenária**. Instituto Politécnico de Tomar. Tomar, p. 209. 2015.

KIESSLING, F. et al. **Contact Lines For Electric Railways**. [S.l.]: Siemens AG, 2009.

MARINO. Montagem mecânica e elétrica de centros e subestações de tração associadas com a área de Sax e torre sineira. **Grupo Marino**, 2015. Disponível em: <<http://www.grupomarino.net/pt/infra-estrutura/66-montaje-mecanico-y-electrico-de-los-centros-y-subestaciones-electricas-de-traccion-asociados-al-area-de-sax-y-campanario.html>>. Acesso em: 16 fev. 2016.

MINISTRY OF RAILWAYS - GOVERNMENT OF INDIA. **Traction Distribution - Over Head Equipments**. Mumbai: [s.n.], 2010.

PIRES, C. L. **Engenharia Elétrica Ferroviária e Metroviária**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2013.

RAIELECTRICA. **Rail Electrica**. Disponível em: <<http://www.raielectrica.com>>. Acesso em: 15 fev. 2016.

SIEMENS. AC Traction Power Supply. **siemens.com/rail-electrification**. Disponível em: <<http://siemens.com/rail-electrification>>. Acesso em: 16 fev. 2016.

SIEMENS AG. **Disconnectors and earthing switches up to 25 kVac**. Erlanger: [s.n.], 2014.

SIEMENS AG. **Disconnectors and switch disconnectors up to 3 kVdc**. [S.l.]: [s.n.], 2014. Acesso em: 2016.

SIEMENS. DC Traction Power Supply. **siemens.com/rail-electrification**. Disponível em: <<http://siemens.com/rail-electrification>>. Acesso em: 16 Fevereiro 2016.

SULLIVAN, T. **Communications Protocol - Experience in Rail & Transit**. Oakland, CA: [s.n.], 2015.

TEAM, C. - -. **Preliminary design of neutral section - The New Line Copenhagen - Ringsted Alinement and Railway Technology**. Copenhagen. 2012.

TERANISHI, M. R. **Visão Sistemicas de Subestações de Tração e Cabines de Paralelismo e Seccionamento**. São Paulo/SP. 2004.

TERANISHI, M. R. **Manutenção da Rede Aérea**. São Paulo. 2010.

TRADE India PPS International - PTFE Short Neutral Section. **Trade India**, 2015. Disponível em: <<http://www.tradeindia.com/fp986012/PTFE-Short-Neutral-Section.html>>. Acesso em: 22 out. 2015.