



**Análise ao Sistema de Alimentação de Tração Elétrica
(1x25 kV - Rede convencional, 2x25 kV - Rede
convencional + Alta velocidade)**

Rui de Carvalho Costa Pereira

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica
- Sistemas Elétricos de Energia**

**Dissertação realizada sob orientação do Professor Doutor Filipe Miguel
Tavares de Azevedo**

**Mestrado em Engenharia Eletrotécnica
Sistemas Elétricos de Energia
Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Instituto Superior de Engenharia do Porto**

Porto, Outubro de 2013

Resumo

O transporte ferroviário é um meio de transporte em que o meio de deslocamento ocorre por meio de vias férreas, transportando, entre outros, pessoas e cargas. Este meio de transporte é um dos mais antigos e a sua origem está ligada diretamente com a Primeira Revolução Industrial, acontecimento histórico que sucedeu na Europa no final do século XVIII e início do século XIX.

Uma rede ferroviária é um sistema único no ponto de vista do uso de tração elétrica assim como no modo que se insere na sociedade por ser um meio de transporte seguro, rápido e bastante utilizado pela população.

As redes de alimentação de energia (transporte e distribuição) e a rede de alta velocidade ditaram novas soluções para a alimentação elétrica ferroviária contribuindo para a sua evolução técnica, na segurança e também na compatibilidade eletromagnética no sentido de se estabelecerem critérios de controlo e prevenção dos efeitos indesejáveis provocados pela interferência magnética.

O presente trabalho tem por objetivo analisar e estudar tecnicamente como se comportam as redes que alimentam os veículos de tração elétrica desde as subestações até à alimentação das locomotivas. Dada a complexidade da sua análise torna-se necessário o recurso a ferramentas de simulação mais ou menos complexas. No presente trabalho recorreu-se ao MATLAB™, nomeadamente, ao MATLAB™/Simulink. Foram analisadas as principais grandezas elétricas em cenários distintos para os sistemas de alimentação da catenária de 1x25 kV e 2x25 kV.

Abstract

Rail transport is a means of transport that occurs through railways, carrying, among others, people and cargo. This means of transport is one of the oldest and its origin is linked directly with the First Industrial Revolution, historic event that happened in Europe in the late eighteenth and early nineteenth century.

Railways are a unique system both from the point of view of electric traction energy use and the way it is merged in society to be a safe means of transport, fast and widely used by the population.

The energy supply networks (transport and distribution) and the high-speed railways contributed in its evolution, in safety and also in electromagnetic compatibility in the sense of establishing criteria for control and prevention of undesirable effects caused by electromagnetic interference.

The present work has as objective to analyze and study technically the behavior of networks that feed the electric traction vehicles from the substations to the feed of the locomotives. Due to the complexity of this analysis, becomes necessary use simulation tools more or less complex. In this work we used the MATLABTM, in particular, the MATLABTM/Simulink .The most important magnitudes of the electric system for various scenarios, with catenaries powered in the 1x25 kV and 2x25 kV systems were analyzed.

Agradecimentos

Começo por agradecer ao Professor Doutor Filipe Miguel Tavares de Azevedo, pela disponibilidade sempre demonstrada na orientação deste trabalho, contribuindo com o seu conhecimento, competência, rigor e apoio para os resultados obtidos.

Ao Eng^o Joaquim Bidarra pelo acompanhamento, apoio, disponibilidade e fornecimento de dados.

À minha família, particularmente aos meus pais, pela forma incansável com que sempre me apoiaram, pela paciência, pela compreensão e pela confiança. Sem eles eu não seria quem sou.

À Rafaela, que sempre me apoiou, sempre acreditou que eu seria capaz.

Aos meus amigos por toda a entreaajuda, pelas palavras de apoio e incentivo nos momentos mais difíceis.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

A todos, o meu muito Obrigado.

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xvii
Lista de Abreviaturas e Acrónimos	xix
Simbologia.....	xxi
Definições	xxiii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Objetivos do trabalho	2
1.2 - Estrutura da tese.....	2
Capítulo 2	5
Sistema elétrico de tração	5
2.1 Tração elétrica	5
2.2 Tração elétrica em Portugal	6
2.3 Vantagens da tração elétrica	8
2.3.1 Vantagem de ordem energética.....	8
2.3.2 Vantagens devidas aos veículos motores elétricos.....	9
2.4 Caracterização do sistema elétrico de tração	10
2.5 Conclusões	12
Capítulo 3	13
Subestações de tração	13
3.1 Subestações 1x25 kV	15
3.1.1 Subestações 1x25kV - Ligação Bifásica.....	16
3.1.2 Subestações 1x25kV - Ligação Trifásica ou em “V”	18
3.2 Subestações 2x25 kV Ligação Bifásica + Autotransformadores	19
3.3 Zonas Neutras entre Subestações	22

3.3.1 Zona neutra convencional.....	23
3.3.2 Zona neutra com isolador de secção	23
3.3.3 Zona neutra seccionada	24
3.3.4 Desfasamentos	24
3.4 Desequilíbrios na Rede Trifásica de alimentação (a montante)	25
3.5 Sistema de proteções	26
3.6 Descrição de uma subestação	27
3.7 Conclusões	28
Capítulo 4	31
Tipos de alimentação da catenária.....	31
4.1 Catenária.....	31
4.1.1 Constituição da catenária	31
4.1.2 Postos de catenária	32
4.2 Alimentação da catenária	33
4.2.1 Alimentação 1x25 kV	34
4.2.2 Alimentação 2x25 kV	35
4.2.3 Comparação entre os sistemas de alimentação	38
4.3 Conclusões	38
Capítulo 5	41
Retorno de corrente de tração.....	41
5.1 Constituição do sistema	41
5.1.1 Cabo de terra enterrado - CdTE.....	42
5.1.2 Cabo de terra aéreo - CdTA.....	43
5.1.3 Ligações elétricas existentes	43
5.2 Sistema de retorno da corrente de tração	45
5.2.1 Sistema tradicional (ST)	46
5.2.2 Sistema com condutor de retorno (RT)	47
5.2.3 Sistema Autotransformador	48
5.2.4 Comparação entre os sistemas	50
5.3 Sistema de ligação à terra	50
5.3.1 LTI - Ligação Transversal Integral (via única)	52
5.3.2 LEAE - Ligação Equipotencial Aéreo / Enterrado (via dupla)	53
5.4 Manutenção do sistema de retorno de corrente de tração, terras e proteção	55
5.5 Conclusões	56
Capítulo 6	57
Simulação de um trânsito de potência monofásico.....	57
6.1 Configuração da rede	57
6.2 Configuração da Locomotiva.....	60
6.3 Sistema 1x25 kV.....	60
6.3.1 Sistema 1x25 kV com ligação bifásica.....	61
6.3.2 Sistema 1x25 kV com ligação trifásica ou em “V”	66
6.4 Sistema 2x25 kV.....	73
6.4.1 Funcionamento normal	74
6.4.2 Modos degradados	79
6.5 Conclusões	80
Capítulo 7	83
Conclusão	83
7.1 Trabalhos Futuros.....	84
Capítulo 8	85
Referências e Anexos	85
8.1 Referências Bibliográficas.....	85
8.2 Anexos	87

8.2.1 Anexo 1 87

Lista de figuras

Figura 2.1 - Locomotiva de Werner von Siemens na Exposição Internacional de Berlim, 1879.....	5
Figura 2.2 - Perfil da linha de Sintra.	7
Figura 2.3 - Representação esquemática do sistema elétrico de alimentação.	11
Figura 3.1 - Representação esquemática básica de uma subestação de tração.	14
Figura 3.2 - Esquema de princípio da ligação bifásica.....	17
Figura 3.3 - Diagrama funcional da ligação bifásica.....	17
Figura 3.4 - Esquema de princípio da ligação trifásica em “V”.	18
Figura 3.5 - Esquema unifilar da subestação da Travagem (1x25kV).	19
Figura 3.6 - Esquema de princípio do Sistema 2x25 kV.	21
Figura 3.7 - Diagrama funcional das SST no sistema 2x25 kV.....	21
Figura 3.8 - Esquema das zonas neutras entre subestações.	23
Figura 3.9 - Zona neutra convencional.	23
Figura 3.10 - Zona neutra com isoladores de secção.....	24
Figura 3.11 - Zona neutra seccionada.....	24
Figura 3.12 - Tipos de ligação dos transformadores das subestações de tração.	26
Figura 4.1 - Esquema do sistema 1x25 kV.	35
Figura 4.2 - Unifilar do sistema 1x25 kV.	35
Figura 4.3 -Autotransformadores.	36
Figura 4.4 - Esquema do sistema 2x25 kV.	37
Figura 4.5 - Unifilar do sistema 2x25 kV.	37
Figura 5.1 - Ligação redundante do carril.....	42

Figura 5.2 - Sistema 1x25 kV.	44
Figura 5.3 - Sistema 2x25 kV.	44
Figura 5.4 - Sistema tradicional.	46
Figura 5.5 - Distribuição do campo magnético no sistema <i>standard</i>	47
Figura 5.6 - Sistema com condutor de retorno.	48
Figura 5.7 - Distribuição do campo magnético no sistema com condutor de retorno.....	48
Figura 5.8 - Sistema autotransformador.....	49
Figura 5.9 - Distribuição do campo magnético no sistema autotransformador.....	49
Figura 5.10 - Gráfico comparativo dos sistemas de retorno de corrente de tração.....	50
Figura 5.11 - Caracterização das zonas.	52
Figura 5.12 - Esquema da Ligação Transversal Integral.....	53
Figura 5.13 - Esquema da Ligação Equipotencial Aéreo / Enterrado.	54
Figura 5.14 - Exemplo de ligação à terra no sistema RT.....	54
Figura 5.15 - Exemplo de ligação à terra no sistema AT.....	54
Figura 5.16 - Esquema geral de retorno de corrente tração, terras e proteção.	56
Figura 6.1 - Rede simulada	57
Figura 6.2 - Modelização em MATLAB™/Simulink do sistema 1x25 kV com ligação bifásica.	61
Figura 6.3 - Modelização do bloco “Subestação 1” (Subestação + Sectores de Catenária 1 e 2).....	61
Figura 6.4 - Tensão na catenária em vazio.	62
Figura 6.5 - Intensidade de corrente na catenária em vazio.	62
Figura 6.6 - Tensões no primário da SST em vazio.....	63
Figura 6.7 - Intensidades de corrente no primário da SST em vazio.....	63
Figura 6.8 - Tensão no pantógrafo do comboio no sistema 1x25 kV.	64
Figura 6.9 - Corrente no pantógrafo do comboio no sistema 1x25 kV.	64
Figura 6.10 - Tensões primário da SST no KC 0 do sistema 1x25 kV.....	65
Figura 6.11 - Intensidades de corrente no primário da SST no KC 0 do sistema 1x25 kV..	66
Figura 6.12 - Modelização em MATLAB™/Simulink do sistema 1x25 kV com ligação em “V”.	67
Figura 6.13 - Tensão na catenária em vazio.....	67

Figura 6.14 - Intensidade de corrente na catenária em vazio.....	68
Figura 6.15 - Tensões no primário da SST em vazio.	68
Figura 6.16 - Intensidades de corrente no primário da SST em vazio.	69
Figura 6.17 - Tensão no sector de catenária 1 no momento do desacoplamento (0.02ms).....	70
Figura 6.18 - Intensidade de corrente no sector de catenária 1 no momento do desacoplamento (0.02ms).	70
Figura 6.19 - Tensão no sector de catenária 2 no momento do acoplamento (0.04ms)....	71
Figura 6.20 - Intensidade de corrente no sector de catenária 2 no momento do acoplamento (0.04ms).	71
Figura 6.21 - Tensões no primário da SST momento do desacoplamento (0.02ms) /acoplamento (0.04ms).	72
Figura 6.22 - Tensões no primário da SST momento do desacoplamento (0.02ms) /acoplamento (0.04ms).	73
Figura 6.23 - Intensidades de corrente no primário da SST momento do desacoplamento (0.02ms) /acoplamento (0.04ms).	73
Figura 6.24 - Modelização em MATLAB TM /Simulink do sistema 2x25 kV com ligação bifásica.	74
Figura 6.25 - Modelização do bloco “Subestação 1” (Subestação + Sectores de Catenária 1 e 2).	74
Figura 6.26 - Tensão na catenária em vazio.....	75
Figura 6.27 - Intensidade de corrente na catenária em vazio.....	75
Figura 6.28 - Tensões no primário da SST em vazio.	76
Figura 6.29 - Intensidades de corrente no primário da SST em vazio.	76
Figura 6.30 - Tensão no pantógrafo do comboio no sistema 2x25 kV.	77
Figura 6.31 - Corrente no pantógrafo do comboio no sistema 2x25 kV.	77
Figura 6.32 - Tensões primário da SST no KC 0 do sistema 2x25 kV.	78
Figura 6.33 - Intensidades de corrente primário da SST no KC 0 do sistema 2x25 kV.	79
Figura 6.34 - Tensão no pantógrafo da locomotiva no sistema 2x25 kV.	80

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Subestações 1x25 kV.	16
Tabela 3.2 – Subestações 2x25 kV.	20
Tabela 3.3 – Tabela de características das zonas neutras.	25
Tabela 5.1 – Distância entre as ligações transversais.	51
Tabela 6.1 – Características da Locomotiva.....	60

Lista de Abreviaturas e Acrónimos

AT	Alta Tensão
AT	Sistema com Autotransformadores
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Continua
CCFP	Companhia Carris de Ferro do Porto
CDTA	Cabo De Terra Aéreo
CDTE	Cabo De Terra Enterrado
EDP	Energias De Portugal
KC	Quilómetro Catenária
LEAE	Ligação Equipotencial Aéreo/Enterrado
LTI	Ligação Transversal Integral
MAT	Muito Alta Tensão
MT	Média Tensão
PCT	Posto Central de Telecomando
PR	Plano de Referencia
RCT	Retorno de Corrente de Tração
REFER	Rede Ferroviária Nacional
REN	Rede Elétrica Nacional
RT	Sistema com condutor de Retorno
SNCF	Sociedade Nacional dos Caminhos de Ferro Franceses
SP	Postos de Seccionamento e Paralelo
SS	Postos de Subseccionamento
SSP	Postos de Subseccionamento e Paralelo
SST	Subestação de tração
ST	Sistema Standard
TI	Transformador de Intensidade
TP	Terras de Proteção

TP Transformador de Potência
TT Transformador de Tensão

Simbologia

B_L	Capacitância da linha
f	Frequência
I	Corrente
I_l	Corrente de linha
P	Potência ativa
R	Resistência
R_L	Resistência da linha
S	Potência aparente
S_{cc3F}	Potência de curto-circuito trifásico
S_{ccFF}	Potência de curto-circuito bifásico
S_{ccFT}	Potência de curto-circuito monofásico
S_n	Potência nominal
U	Tensão
V	Tensão
V_l	Tensão de linha
V_n	Tensão nominal
X	Reactância
X_L	Reactância da linha
Z_c	Impedância da catenária
Z_f	Impedância do <i>feeder</i>
Z_r	Impedância de retorno
Z_{cc}	Impedância de curto-circuito

Definições

Apoio de catenária - elemento de linha aérea de tração destinado a suportar catenárias, cabos de terra, *feeder's* e isoladores.

Bogle - conjunto de dois eixos que suportam a locomotiva e através das rodas assentam na via-férrea.

Cabo de terra - condutor que liga entre si e a terra (ou aos carris) vários apoios de Catenária

Catenária - é uma instalação aérea e fixa, que tem como principal função o transporte de energia elétrica aos recetores (unidades motoras e transformadores). A instalação é formada por um ou mais fios de contacto e um ou mais condutores longitudinais que suportam mecanicamente estes. Consideram-se englobadas nesta designação as linhas aéreas constituídas apenas por fio de contacto.

Catenária principal - são geralmente as catenárias de linhas principais de circulação e, exceccionalmente as catenárias de linhas secundárias, quando estas estão ligadas permanentemente à catenária da referida linha principal.

Qualquer intervenção nas mesmas implica a atuação do Posto Central de Telecomando (PCT).

Catenária secundária - sempre que a tensão possa ser ligada ou desligada no local, sem intervenção do posto central de telecomando a catenária diz-se secundária. Neste grupo incluem-se algumas linhas de resguardo, as linhas de cais em estações, as linhas de serviço de depósitos e oficinas, ramais particulares e linhas de formação. A sua alimentação faz-se em geral a partir da catenária principal contígua.

Circuito de retorno - o retorno da corrente de tração às subestações de tração é garantido pelo caminho de rolamento carril e pela terra. A continuidade deste circuito deve ser permanentemente assegurada.

Circuito de terra - conjunto de condutores de terra, elétrodos de terra e respectivas ligações.

Comprimento do vão - distância medida sobre o eixo do traçado da via-férrea entre dois apoios de catenária consecutivos.

Condutor - elemento destinado à condução elétrica podendo ser constituído por um fio, conjunto de fios devidamente reunidos ou por perfis adequados.

Condutor compensado - condutor cuja força de tração mecânica é mantida constante numa certa gama de temperatura ambiente por meio de equipamentos tensores.

Condutor multifilar - condutor constituído por vários fios sem isolamento entre si.

Condutor unifilar ou fio - condutor constituído por um único fio.

Condutor nu - condutor que não possui qualquer isolamento exterior.

Condutor isolado - condutor revestido de uma ou mais camadas de material isolante que asseguram o seu isolamento elétrico.

Continuidade longitudinal - ligação entre os troços a montante e jusante do seccionamento.

Elétrodo de terra - conjunto de materiais condutores enterrados destinados a assegurar boa ligação elétrica com a terra e ligado num único ponto (ligador do elétrodo) ao condutor de terra.

Equipamento de suspensão de catenária - equipamento fixo a um ou a dois apoios de catenária e destinado a suportar uma ou mais catenárias.

Feeder - linha aérea ou subterrânea eletricamente isolada da catenária, que pode ser ligada à mesma através do equipamento elétrico conveniente.

Fio de contacto - linha aérea constituída por um condutor de cobre eletrolítico no qual o pantógrafo se apoia para captar a corrente.

Flecha de um condutor ou de um cabo de terra - distância entre o ponto do condutor, ou do cabo de terra onde a tangente é paralela à reta que passa nos pontos de fixação, e a intersecção da vertical desse ponto com essa reta e o suposto condutor ou o cabo de terra não desviados pelo vento.

Força máxima de tração - maior força de tração que numa linha aérea pode existir no condutor, ou no cabo de terra na hipótese de cálculo mais desfavorável e que se verifica no ponto de fixação de cota mais elevada.

Interruptor - aparelho de manobra destinado a estabelecer, suportar e interromper a corrente elétrica nas condições normais do circuito, incluindo condições determinadas de sobrecarga, assim como suportar por um período determinado correntes em condições transitórias, tais como correntes de arranque. Pode também ser previsto para estabelecer, mas não para cortar automaticamente, correntes anormalmente elevadas, tais como correntes de curto-circuito. Trata-se de um aparelho de corte sem qualquer proteção.

Linha aérea - linha elétrica em que os condutores são mantidos a uma altura conveniente acima do solo.

Linha aérea de tração elétrica - linha aérea destinada ao transporte de energia para a tração elétrica cuja tensão nominal é a das unidades motoras elétricas.

Linha elétrica - conjunto de condutores, de isoladores, de acessórios e de suportes destinados ao transporte e distribuição de energia elétrica.

Linha subterrânea - linha elétrica constituída por cabos isolados de tipo apropriado, enterrada no solo ou instalada em galerias, em túneis ou em caleiras.

Linha de telecomunicações - instalação elétrica destinada exclusivamente à transmissão de sinais ou informações de natureza semelhante.

Massa - qualquer elemento condutor suscetível de ser tocado diretamente, em regra isolado das partes ativas de um material ou aparelho elétrico, mas podendo ficar acidentalmente sob tensão.

Posto central de telecomando (PCT) - é o local onde está instalado o equipamento que permite realizar o comando à distância da aparelhagem instalada nas subestações de tração e nos postos de catenária. Este posto está sempre guarnecido permitindo saber em qualquer momento, o estado físico de todo o equipamento existente nas instalações que dele dependem e realizar a sua gestão.

Postos de catenária - são postos cuja aparelhagem (interruptores ou disjuntores) é sempre telecomandada a partir do posto central de telecomando e podem classificar-se segundo as suas funções.

Postos de subseccionamento (SS) - são postos que estão eletricamente ligados a um seccionamento de lâmina de ar (ou isolador de secção) e realizam a operação de continuidade longitudinal.

Postos de subseccionamento e paralelo (SSP) - são postos que estão eletricamente ligados a seccionamentos de lâmina de ar (um em cada via) e realizam em cada uma delas a operação de continuidade longitudinal. A operação de paralelo transversal é feita geralmente do lado da subestação.

Postos de seccionamento e paralelo (SP) - são postos que estão eletricamente ligados a zonas neutras entre subestações. Permitem realizar a continuidade longitudinal a montante e jusante da zona neutra (operação que se realiza em exploração normal) e a operação de paralelo transversal para cada um dos lados.

Postos de ramal - são postos que permitem realizar a operação de alimentação de Linhas desviadas em relação a entroncamentos de linhas ou ramais importantes. Por vezes estes postos podem permitir a operação de paralelo transversal.

Posto de barramento - são postos onde várias secções elementares são ligadas a um barramento através de interruptores. Em bifurcações ou em entroncamentos permitem realizar as operações de paralelo transversal e alimentação de linhas desviadas, realizando por vezes também a operação de continuidade longitudinal.

Postos auxiliares - são postos equipados com seccionadores e ligados geralmente a um seccionamento de lâmina de ar. Permitem fazer a operação de continuidade longitudinal, tendo indicação de falta de tensão na secção elementar a jusante em relação à subestação. Por vezes podem realizar a operação de alimentação de linhas desviadas, tendo então indicação de falta de tensão do lado do ramal.

Resistência de terra - valor da resistência elétrica medida entre um eléctrodo de terra e um eléctrodo de terra auxiliar suficientemente afastados entre si de forma que ao escoar-se uma corrente pelo eléctrodo de terra, não seja sensivelmente modificado o potencial do eléctrodo de terra auxiliar.

Seccionador - aparelho de manobra em vazio que assegura na posição de abertura, uma distância de seccionamento satisfazendo as condições determinadas.

Secção elementar - é o menor troço de catenária que pode ser isolado eletricamente.

Secção efetiva de um condutor ou cabo de terra - área de secção reta do fio ou a soma das áreas das secções retas dos fios que constituem o condutor ou o cabo de terra.

Secção nominal de um condutor ou cabo de terra - valor arredondado da secção efetiva para efeitos de designação normalizada.

Sector - é o troço de catenária compreendida entre uma subestação e uma zona neutra ou entre uma Subestação e o fim de linha eletrificada.

Sector auxiliar - é o conjunto de subsectores compreendidos entre um posto de ramal e o fim de linha eletrificada do ramal.

Subsector - é o troço de catenária compreendido entre dois postos de catenária consecutivos ou entre uma subestação e o posto de catenária adjacente ou ainda entre um posto de catenária e o fim de linha eletrificada.

Subestação de tração - Instalação destinada à alimentação em energia elétrica das catenárias, criteriosamente localizadas ao longo da via. Estas subestações estão ligadas diretamente a subestações da rede primária do país, em níveis de tensão de alta tensão e muito alta tensão, transformando-a em 25 kV.

Tensão nominal de uma linha - tensão pela qual a linha é designada e em relação à qual são definidas as suas características.

Terra - massa condutora da terra.

Terras distintas - circuitos de terra suficientemente afastados para que o potencial de um deles não sofra uma variação superior a 5% do que acontece no outro quando este último é percorrido por uma corrente elétrica.

Travessia - intersecção, em projeção horizontal, do traçado de uma linha com uma catenária.

Vão - distância entre dois apoios de catenária consecutivos.

Zona de serviço ferroviário - terreno do domínio público ferroviário ou terreno de propriedade de concessionária de exploração ferroviária afeto a esse serviço nunca superior à resultante de distância de 2,5 m ao carril exterior das vias do caminho-de-ferro.

Zona de influência de uma terra - área dentro da qual o potencial do solo sofre uma variação superior a 5% do que acontece no elétrodo de terra respetivo quando percorrido por uma corrente elétrica.

Zona neutra - por regra a cada subestação de tração encontra-se associada uma zona neutra por via (conceito tradicional de alimentação bifásica a 90°). Entre duas subestações de tração contíguas, existe sempre uma zona neutra. Quando as subestações são do tipo “monofásico” pode dispensar-se a construção de uma zona neutra. Em determinadas situações e para uma melhor exploração da linha eletrificada é recomendado construir zonas neutras associadas a subestações deste tipo. Uma zona neutra é construída de tal forma que permite a passagem aerodinâmica de todos os pantógrafos das unidades motoras sem qualquer imposição de ordem mecânica e determina uma imposição de ordem elétrica, que é a obrigatoriedade de desligar o disjuntor da unidade motora.

Zona neutra com isoladores de secção - este tipo de zona neutra, de construção muito mais simples é constituída por dois isoladores de secção de alta velocidade em cada via, distanciados entre si 30 metros.

Zona neutra convencional - em cada uma das extremidades existe uma zona comum. Onde cada pantógrafo toca simultaneamente em duas catenárias, sendo uma a da zona neutra.

Zona neutra seccionada - consiste na montagem de dois troços de catenária isolados, descentrados e aproximadamente paralelos.

Zona comum - é uma zona de transição entre duas catenárias que tem como principal função a separação mecânica.

Zona Seccionamento de lâmina de ar - é uma zona de transição entre duas catenárias que tem como principal função a separação elétrica e mecânica.

Capítulo 1

Introdução

Muito cedo se recorreu à tração elétrica nos caminhos de ferro, o seu aparecimento data de 1879 na Alemanha. Em Portugal, a 15 de Agosto de 1926 foi inaugurado o serviço de tração elétrica na linha de cascais com recurso a subestações de tração com rectificadores da tensão primária nos 1500 V cc aplicados à catenária [1].

Rapidamente as vantagens da eletrificação justificaram o aparecimento de linhas de tração elétrica: nas redes de carros elétricos, redes de metropolitanos, em vias férreas com grandes extensões em túneis, linhas suburbanas das cidades, vias com grandes frequências de comboios, e em vias com traçados montanhosos.

A agora possibilidade de se viajar ilimitadamente, percorrendo com rapidez distâncias até há pouco inacessíveis, alterou todo o modo de vida das populações possibilitando migrações humanas, viagens de lazer, viagens de negócios etc. A troca comercial de mercadorias deu origem ao que seria o embrião das modernas redes logísticas.

As infra-estruturas ferroviárias são um sistema elétrico complexo constituído por subestações de tração, linhas de transmissão (catenárias) e locomotivas. As subestações de tração e as catenárias constituem as redes de alimentação e as locomotivas constituem as cargas variáveis no espaço (deslocação das unidades motoras ao longo da catenária).

Os sistemas de alimentação em 1500 V cc não são abordados por terem pouca expressão no caminho-de-ferro em Portugal com tendência à sua migração para o sistema alimentado a 25 kV 50 Hz. Este sistema alternado sinusoidal a 25 kV 50Hz foi implementado pela primeira vez na subestação de tração de Moscavide no ano em que se celebrou os 100 anos de caminho-de-ferro em Portugal. Desde então este sistema permitiu alimentar extensões de catenária mais longas e locomotivas com potências mais elevadas.

1.1 - Objetivos do trabalho

Esta tese procura contribuir para o estudo do comportamento das redes de alimentação dos veículos de tração elétrica, tendo como principais objetivos a atingir:

- Estudo das subestações de tração, nomeadamente as subestações e seus tipos de ligação para os sistemas 1x25 kV e 2x25 kV. Analisar os desequilíbrios causados na rede trifásica de alimentação (a montante);
- Estudo da catenária, tipos de alimentação;
- Estudo e análise do sistema de retorno de corrente de tração;
- Elaboração de um trânsito de potência monofásico.

1.2 - Estrutura da tese

Este documento está organizado em sete capítulos, sendo o presente uma introdução ao trabalho.

O **Capítulo 2** faz uma abordagem ao sistema elétrico de tração. É descrito o conceito de tração, a sua origem e as características das primeiras locomotivas, o começo da tração elétrica e a sua constituição em Portugal. São analisadas as vantagens da tração elétrica e por fim é caracterizado o sistema elétrico de tração, desde a produção de energia elétrica até à alimentação das locomotivas.

O **Capítulo 3** faz uma descrição das subestações de tração, nomeadamente o conceito de subestação de tração, os sistemas de alimentação e tipos de ligação existentes, as zonas neutras, tipos de proteções e o impacto na rede trifásica de alimentação (a montante).

O **Capítulo 4** descreve o conceito de catenária, as suas características, os tipos de alimentação e faz uma comparação entre os diferentes tipos.

O **Capítulo 5** aborda o retorno de corrente de tração, descrevendo o sistema e os principais constituintes. Descreve também o sistema de ligação à terra e a manutenção dos diferentes sistemas.

O **Capítulo 6** faz uma análise ao sistema de alimentação de tração elétrica por intermédio da simulação de um trânsito de potência monofásico. Por fim são apresentados os resultados das simulações realizadas para os cenários estudados.

O **Capítulo 7** congrega as principais conclusões da tese e deixa algumas sugestões de trabalho futuro.

Capítulo 2

Sistema elétrico de tração

2.1 Tração elétrica

A tração elétrica é uma forma de utilização de energia que aproveita a capacidade de transformação de energia elétrica em energia mecânica para promover o deslocamento de um ou de mais veículos.

A aplicação da eletricidade na tração apareceu no ano de 1879, logo nos primórdios da exploração industrial daquela forma de energia. Werner von Siemens nesse ano, apresentou na Exposição Internacional de Berlim uma pequena locomotiva (Figura 2.1), acionada por um motor elétrico de corrente contínua, que rebocou três pequenos vagões, constituídos por bancos de seis lugares montados sobre rodas, e que podiam transportar 18 passageiros. A alimentação era feita por um carril central, em corrente contínua, com uma tensão de 150 V, sendo o circuito de retorno constituído pelos carris de guiamento.

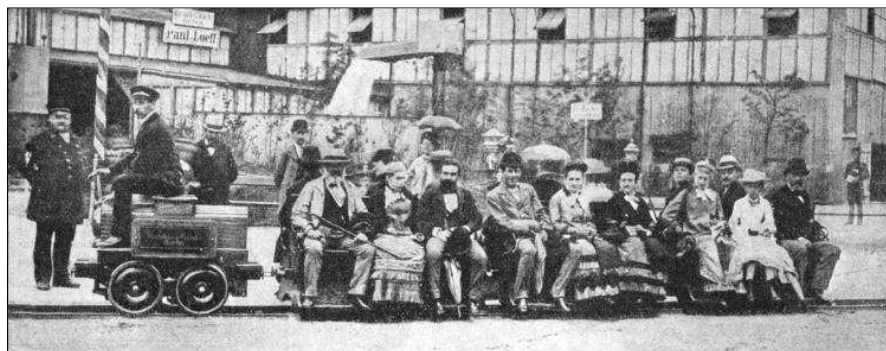


Figura 2.1 - Locomotiva de Werner von Siemens na Exposição Internacional de Berlim, 1879.

O comboio elétrico da empresa Siemens & Halske apresentou, desde logo, todo o conjunto de problemas inerentes à tração elétrica: o problema da alimentação em energia do veículo motor, o problema da disponibilidade e controlo da força motriz e, também, todo o conjunto de problemas inerentes à exploração deste novo sistema de transporte.

Nos anos seguintes, foi grande o estudo e a experimentação efetuados na procura de soluções para aquele amplo conjunto de problemas. Nos dias de hoje, ainda continuam a realizar-se estudos e continua a realizar-se investigação no âmbito da tração elétrica, mas existe já um vasto conjunto de soluções possíveis, que só não são adotadas porque dependem de opções de carácter político ou económico, que ultrapassam o domínio da tração elétrica [2].

2.2 Tração elétrica em Portugal

A tração elétrica em Portugal, deu início ao seu desenvolvimento com a tração elétrica urbana. As companhias privadas de transporte público introduziram os primeiros veículos de tração elétrica em Portugal.

A Companhia Carris de Ferro de Lisboa, em 1887, fez experiências, classificadas como inconclusivas, com um veículo eletrificado e alimentado por acumuladores e a companhia que explorava os transportes públicos na região metropolitana da cidade do Porto (CCFP) instalou os primeiros carros elétricos com alimentação por linha aérea em 1895. Esta rede de transportes, em corrente contínua, desenvolveu-se de tal forma que serviu muito bem a cidade e os arredores até 1958 quando começou a ser reduzida. Em 1959 foram introduzidos os troleicarros, e começou-se a desenvolver a rede de transportes elétricos rodoviários, na região metropolitana do Porto. Existiram também, ou ainda existem, redes de transportes elétricos urbanos na região metropolitana das cidades de Braga, de Coimbra e de Lisboa e realizaram-se experiências de tração elétrica (GLT - Transporte em Linha Guiada) na cidade da Maia.

Em 30 de Dezembro de 1959 deu se inicio à exploração da rede de metropolitano de Lisboa. Trata-se de um sistema de tração elétrica, em corrente contínua com uma tensão de 750 V. A rede tinha uma extensão de 11,931 km em 1980 que foi aumentando com o passar dos anos.

O material circulante é constituído por carruagens automotoras assentes em dois bogies, com cabinas de condução nas extremidades. A captação da corrente elétrica é feita por dispositivos de assentamento de sapatas num terceiro carril, e o retorno é feito através dos carris. A motorização inicial era feita com motores de corrente contínua, mas estão já em funcionamento carruagens com motorização trifásica com motor de indução.

A tração elétrica tem aumentado, nos últimos anos, o número de linhas eletrificadas.

Linha do Norte - eletrificada em corrente alternada monofásica com frequência industrial, 25 kV, 50 Hz, estende-se de Lisboa ao Porto. Foi ligada à rede elétrica nacional (60 kV) através de subestações de transformação. Esta linha elétrica é percorrida por veículos com motorização por motores de corrente contínua e, recentemente, por motores de indução. Ligada a esta linha principal encontram-se eletrificados os ramais de Coimbra A - Coimbra B, e a linha da Figueira da Foz.

Linha de Sintra - também está eletrificada em tensão alternada monofásica, 25 kV, 50 Hz, e liga Lisboa-Rossio a Sintra (Figura 2.2). O perfil desta linha é bastante inclinado, análogo ao de uma linha de montanha. Esta linha é percorrida, essencialmente, por UTE, unidades triplas elétricas, frequentemente ligadas numa composição de duas ou três UTE. Também estão em serviço UQE, unidades quádruplas elétricas, com acionamento trifásico por motores elétricos de indução.

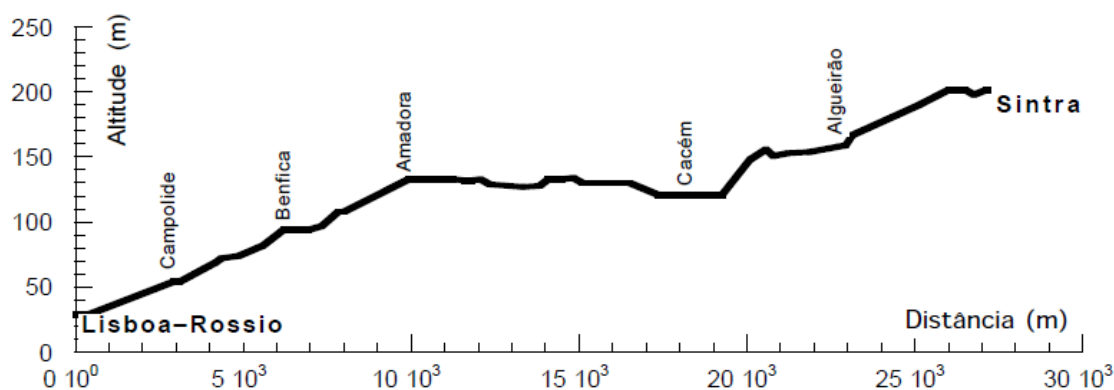


Figura 2.2 - Perfil da linha de Sintra.

Linha de Cascais - Estende-se de Lisboa-Cais do Sodré até Cascais. Está eletrificada em corrente contínua, 1500 V. Foi a primeira linha de caminho-de-ferro eletrificada em Portugal no ano de 1926.

Linha da Beira Alta - via dupla entre Pampilhosa (Linha do Norte) e Vilar Formoso, numa extensão de duzentos e dois quilómetros, tem subestações de tração, sistema 2x25 kV, 50 Hz alimentado pela rede da REN (EDP) de 220 kV, em Mortágua, Gouveia e Sobral.

Linha do Minho - Encontra-se eletrificada em via dupla apenas até Braga e Guimarães.

Linha do Douro - Está eletrificada até Caíde, em via dupla e em exploração suburbana [3].

No Anexo 1 encontra-se o mapa da Rede Ferroviária Portuguesa, onde constam todas as linhas mencionadas anteriormente.

2.3 Vantagens da tração elétrica

A tração elétrica apresenta algumas vantagens próprias, entre elas:

2.3.1 Vantagem de ordem energética

- A rede de tração ferroviária pode servir para ajudar a regularizar o diagrama de cargas diário uma vez que se encontra ligada à rede elétrica nacional. Os consumos de energia pelos comboios elétricos efetuam-se a qualquer hora, podendo alguns ser desviados para horas vazias, como, por exemplo, os comboios de mercadorias.

- Nos dias de hoje, quando a carga imposta pela tração elétrica é uma parte pouco significativa do diagrama de cargas da rede nacional, já não existe o problema de desequilíbrio de cargas, problema este que era importante no início da eletrificação da Linha do Norte em Portugal.

- Relativamente ao rendimento do consumo de energia elétrica por um sistema de transporte com acionamentos eletromecânicos é também superior ao rendimento obtido com os outros sistemas de tração. O rendimento energético do conjunto central térmica – linha aérea – locomotiva é superior ao de uma locomotiva térmica.

- Se o veículo elétrico tem de transportar a sua fonte de energia, as vantagens da tração elétrica diminuem substancialmente. O peso desses sistemas é de tal

ordem que diminui, muito, o rendimento energético do veículo, além do que é pequena a sua autonomia, e é considerável o seu tempo de recarga.

2.3.2 Vantagens devidas aos veículos motores elétricos

Os veículos com acionamento elétrico apresentam as seguintes vantagens dadas as características do motor elétrico:

- Potência - a potência instalada só é limitada pelo peso total da locomotiva, pelo esforço de tração disponível e pelo peso aderente. A potência só é limitada pela capacidade das instalações fixas de alimentação e o esforço de tração pela resistência à rutura dos sistemas de atrelagem.

- Capacidade de Sobrecarga - o motor elétrico pode suportar sobrecargas tanto mais altas quanto menor for o respetivo tempo de duração. A capacidade de sobrecarga de um motor elétrico só é limitada pelo aquecimento da máquina elétrica.

Não é possível obter o mesmo comportamento com os motores térmicos. Esta característica permite que uma locomotiva elétrica possa arrancar com grandes cargas, tanto em patamar, como em rampa.

- Características do Motor - o motor elétrico pode apresentar, naturalmente ou devido à estratégia de controlo adotada, as características de funcionamento próprias para a tração elétrica:

- Facilidade na regulação da velocidade do motor por alteração do valor da tensão nos terminais ou por alteração da amplitude do fluxo magnético indutor;
- Adaptação da velocidade à situação de carga: o motor diminui naturalmente a velocidade quando aumenta o esforço de carga;
- No arranque o motor desenvolve um bom binário de arranque;
- O funcionamento do motor elétrico é reversível, pelo que pode funcionar como gerador, e assim contribuir para a frenagem do veículo acionado.
- Velocidade Elevada - velocidades de 160 km/h a 180 km/h são normais, e em linhas próprias as locomotivas podem atingir uma velocidade de deslocação superior a 250 km/h. Na tração elétrica, o recorde de velocidade sobre carris é de 515,3 km/h (18 de Maio de 1990) [3].

2.4 Caracterização do sistema elétrico de tração

Para que a rede de tração elétrica seja alimentada, é necessário que exista uma rede de produção e transporte de energia suficientemente robusta para que o consumo da rede de tração não afete de forma significativa o desempenho da rede nacional, respeitando os parâmetros definidos no Regulamento de Qualidade de Serviço. A rede de tração tem necessariamente que ser alimentada pela rede nacional com interligação internacional e pretende-se ser um sistema trifásico equilibrado.

A produção de energia elétrica é feita de várias formas, pelas barragens, centrais térmicas, painéis solares, sistemas eólicos, força das marés. A esta primeira fase chama-se a fase da Produção ou Geração.

Nesta primeira fase a energia produzida é conduzida para subestações elevadoras que transformam a tensão em Muito Alta Tensão (MAT) para que se seja feito o seu transporte com tensões mais elevadas e com perdas ativas mais reduzidas. A REN é a empresa em Portugal responsável pelo transporte. Na rede de transporte as tensões utilizadas são de 150, 220 e 400 kV.

A alteração do nível de tensão é feita pelos chamados transformadores de potência.

Depois da tensão ser elevada, a energia é transportada até às subestações de distribuição, ou seja, subestações abaixadoras que reduzem o nível de tensão para distribuição em Alta Tensão (AT) ou Média Tensão (MT).

A Figura 2.3 exibe um esquema resumo do funcionamento de duas redes elétricas distintas e sua interligação, a rede de produção, transporte e distribuição de energia e a rede de tração elétrica [4].

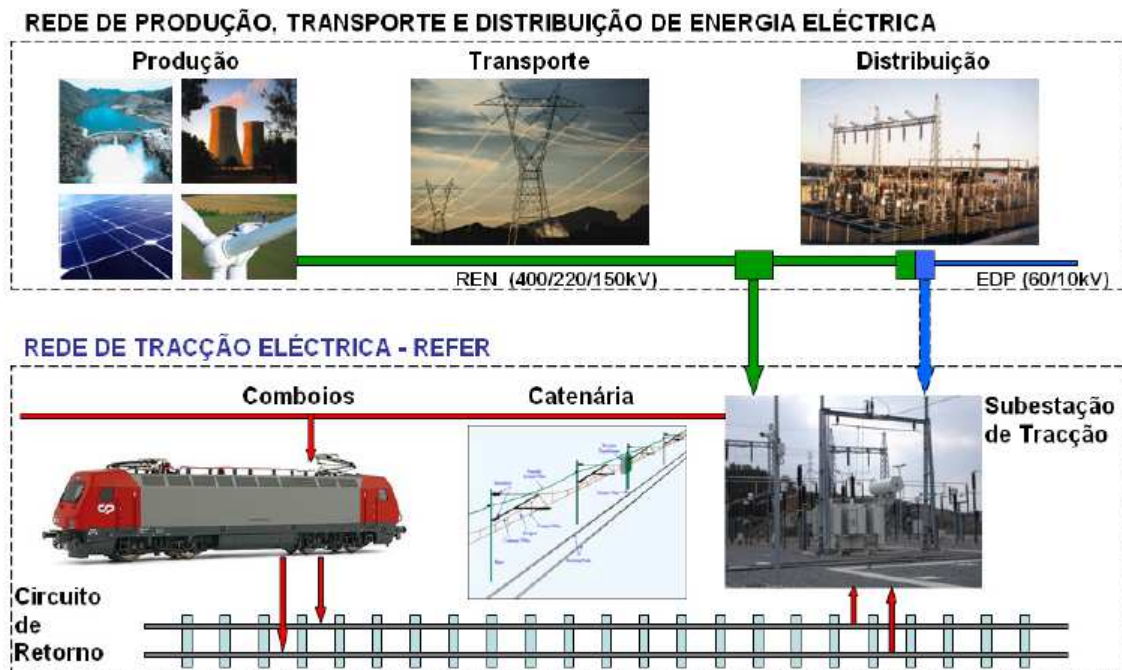


Figura 2.3 - Representação esquemática do sistema elétrico de alimentação.

O sistema elétrico de tração é por natureza, visto do seu lado primário, um sistema bifásico.

Na perspetiva da rede de alimentação, as cargas ferroviárias são emissoras de correntes inversas que dão origem a desequilíbrios no sistema trifásico de tensões. A adequação das perturbações injetadas às características próprias da rede de alimentação é fundamental para atingir os objetivos de qualidade exigidos.

A garantia dos padrões de qualidade de fornecimento de energia aos comboios e a sua compatibilização com a rede de alimentação por outro lado, deve ser um princípio de orientação no dimensionamento das infraestruturas ferroviárias.

O sistema de tração elétrica é constituído por um conjunto de subsistemas que compõem as instalações fixas de tração elétrica:

- Rede de energia elétrica da EDP/REN - linhas de alimentação MAT, AT e MT;
- Subestação de tração (SST) - instalação cujas principais funções são adaptar a tensão da rede de alimentação para um nível de tensão adequado aos comboios e providenciar proteção contra defeitos e perturbações elétricas. Após a adaptação, a energia é distribuída à catenária ficando disponível à utilização pelos comboios;
- Catenária - linha aérea instalada sobre a via-férrea com o objetivo de fornecer energia elétrica aos comboios. É constituída, nos sistemas mais comuns, por

um fio de contacto, um cabo de suporte, pêndulos e todo um conjunto de estruturas de suporte (postes, consolas, pórticos, etc.);

- Sistema de retorno de corrente de tração - conjunto de condutores (incluindo carril e terra) cuja função é providenciar um caminho seguro para o retorno da corrente captada pelos comboios até à subestação;
- Carga - locomotivas e automotoras elétricas que captam energia por contacto entre a catenária e os carris. Os pontos de contacto com o sistema de alimentação são o pantógrafo na catenária e os rodados nos carris [5].

2.5 Conclusões

Com o início da exploração industrial da eletricidade, surgiu a tração elétrica. Desde essa altura, este sistema de transporte tem vindo a desenvolver-se, acompanhando e contribuindo para a evolução tecnológica e para alteração das condições sociais. Foi o primeiro meio de transporte a criar as bases da civilização moderna, desenvolveu-se em vários modos de transporte: caminho-de-ferro pesado onde se incluem os serviços de passageiros e mercadorias, os metropolitanos e os carros elétricos.

Neste capítulo foi feita uma introdução à tração elétrica, descrevendo a sua origem, as características e os primeiros problemas encontrados. Foi descrito, de forma sucinta, a origem e a evolução da tração elétrica em Portugal assim como as linhas existentes.

Foram analisadas as vantagens deste tipo de tração e por fim caracterizado um sistema elétrico de tração, descrevendo de uma forma geral os seus constituintes. Os subsistemas principais serão descritos nos próximos capítulos.

Capítulo 3

Subestações de tração

Subestações de tração são instalações criteriosamente localizadas que garantem o fornecimento de energia à catenária a partir da rede do distribuidor público, transformam do nível de tensão de forma a poder ser utilizado pelos comboios e dispõem de proteção contra defeitos e perturbações elétricas. São constituídas por um conjunto de equipamentos de corte, medida, comando, proteção e como elementos centrais, os transformadores de potência.

A conceção e a filosofia de cada sistema de alimentação têm que ser encaradas nas especificidades técnicas e de exploração de cada um. Em Portugal, os transportes em ferrovia são alimentados a 25 kV (catenária), exceto na Linha de Cascais que funciona a 1.500 V cc (catenária), e os metropolitanos pesados (3º carril) e ligeiros a 750 V cc (linha aérea de contacto).

Normalmente as subestações de tração elétrica no sistema 25 kV 50 Hz podem ser alimentadas diretamente pela rede de transporte, em MAT ou através da rede de distribuição em AT ou MT, com potências instaladas que variam entre 16,2 e 32 MVA. A escolha do nível de tensão depende essencialmente da potência a contratar e da potência de curto-circuito disponibilizada pela EDP ou REN no local.

Estas subestações alimentam troços eletrificados da ordem dos 25 a 50 Km, para um e outro lado da subestação. Deste modo, e caso seja necessário, as subestações podem distar umas das outras da ordem de 50 a 100 Km, dependendo do sistema de alimentação.

Para a tensão de 25 kV 50Hz, entre a catenária e o carril, por razões económicas e tendo em conta a proximidade da linha primária do fornecedor de energia, existem os sistemas de alimentação de 1x25 kV ou de 2x25 kV [4, 6, 7].

Para cada sistema de alimentação existem diferentes tipos de ligação como será abordado no Capítulo 4.

Ambos os sistemas possuem características distintas no que se refere a custos de instalação, a distância entre subestações entre outros.

As subestações de tração (Figura 3.1) são alimentadas por uma ou duas linhas de alimentação bifásicas ou trifásicas e são constituídas fundamentalmente por:

- Aparelhagem de corte, lado AT;
- Transformadores de potência;
- Aparelhagem de corte, lado catenária;
- Equipamento de proteção;
- Serviços complementares.

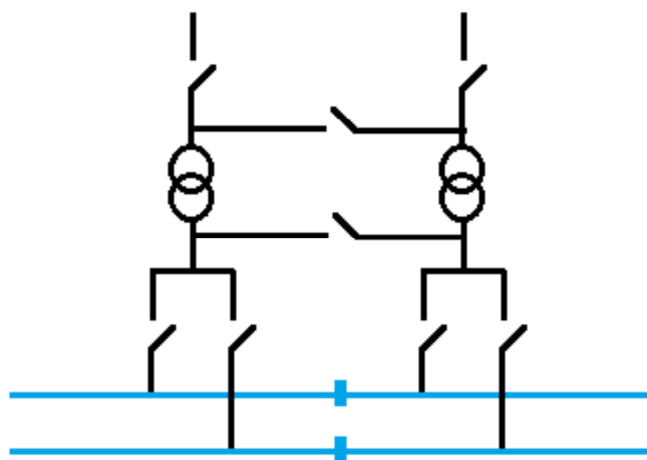


Figura 3.1 - Representação esquemática básica de uma subestação de tração.

A aparelhagem de corte de ambos os lados do transformador de potência permite, mediante a topologia utilizada, uma maior ou menor versatilidade de utilização da instalação, particularidade de extrema importância em termos de manutenção e exploração do sistema, proporciona caminhos alternativos para o fluxo de energia desde a chegada à subestação de tração por qualquer das linhas de alimentação até aos seccionadores de alimentação da catenária.

A aparelhagem de corte deste tipo de subestações inclui disjuntores e seccionadores, sendo cada vez mais utilizados os disjuntores que possuem câmaras de corte em SF-6 pelo facto de necessitarem de uma reduzida manutenção, e os seccionadores do tipo pantógrafo ou de colunas rotativas.

Os transformadores de potência são do tipo em banho de óleo, possuem regulação de tensão fora de carga e eventualmente também em carga. A sua ventilação é natural, apesar de em certos casos especiais se possa implementar uma ventilação do tipo forçado, com o objetivo de reduzir a potência a instalar, alterando assim os regimes de sobrecarga da máquina.

Nos equipamentos de proteção existem principalmente os sistemas de para-raios, os corta-circuitos fusíveis, os disjuntores BT e os relés de proteção associados aos disjuntores AT.

Os serviços complementares, instalados no edifício de comando da subestação de tração, compreendem os painéis de comando e de serviços auxiliares CA/CC, de contagem, de proteção, de registo cronológico de acontecimentos, de regulação automática de tensão, de telemedida, de bateria/carregador, de autómato, de interface com o sistema de telecomando.

O critério determinante na escolha do esquema de ligação dos transformadores de potência nas subestações de tração à rede de alimentação é a limitação do desequilíbrio provocado na rede de alimentação trifásica. Consoante a forma de ligação ter-se-ão diferentes níveis de desequilíbrio sobre a rede trifásica [8].

3.1 Subestações 1x25 kV

Existem 18 subestações de tração para o sistema 1x25 kV em Portugal como se pode verificar na Tabela 3.1.

- Distância entre subestações é de aproximadamente 60 km.
- Nos sistemas alimentados com tensão alternada as subestações encontram-se separadas eletricamente através de Zonas Neutras.
- Caso uma subestação seja colocada fora de serviço, o troço de catenária associado será alimentado pelas subestações colaterais.

Tabela 3.1 – Subestações 1x25 kV.

Linha	Subestação	Alimentação	Tipo ligação	Potência instalada (MVA)	Ano de entrada ao serviço	Obs.
Sintra	Amadora	Bifásica 63 kV	Bifásica	32	1973	Remodelada em 1998
Norte	V. F. Xira	Trifásica 63 kV	“ V “	32	1993	
	Entroncamento	Trifásica 63 kV	“ V “	20	1958	Remodelada em 2009
	Litém	Bifásica 63 kV	Bifásica	10	1991	
	Alfarelos	Trifásica 63 kV	“ V “	32	1963	Remodelada em 2002
	Salreu	Trifásica 63 kV	“ V “	32	1964	Remodelada em 2000
Minho	Travagem	Trifásica 63 kV	“ V “	32	1966	Remodelada em 2003
Douro	Irivo	Bifásica 220 kV	Bifásica	20	2002	
Beira Baixa	Abrantes	Bifásica 63 kV	Bifásica	10	1995	
	Ródão	Bifásica 150 kV	Bifásica	16,2	2004	
Vendas Novas	Quinta Grande	Bifásica 150 kV	Bifásica	16,2	1998	
Alentejo	Pegões	Trifásica 150 kV	Bifásica	16,2	1998	
Sul	Fogueteiro	Bifásica 150 kV	Bifásica	20	1998	
	Monte Novo - Palma	Bifásica 150 kV	Bifásica	12	2002	
	Ermidas do Sado	Bifásica 150 kV	Bifásica	12	2002	
	Luzianes	Bifásica 150 kV	Bifásica	12	2004	
	Tunes	Bifásica 63 kV	Bifásica	12	2004	SST Blindada (25kV)
Sines	Santiago do Cacém	Bifásica 63 kV	Bifásica	12	2002	

3.1.1 Subestações 1x25kV - Ligação Bifásica

A Figura 3.2 apresenta uma configuração com alimentação bifásica, em que existem 2 transformadores de potência alimentados pelas mesmas fases, funcionando um em carga e outro em reserva [4, 9].

Neste caso não é obrigatório existir uma zona neutra em frente à subestação para separação de fases. No entanto poderá existir uma zona neutra para facilitar a exploração da rede.

A escolha das fases de alimentação está normalmente ligada aos desequilíbrios já existentes na rede de alimentação. Tenta-se com a escolha das fases que o desequilíbrio introduzido pelas cargas elétricas ferroviárias quando conjugado com o desequilíbrio já existente na rede tenha o menor impacto no desequilíbrio final.

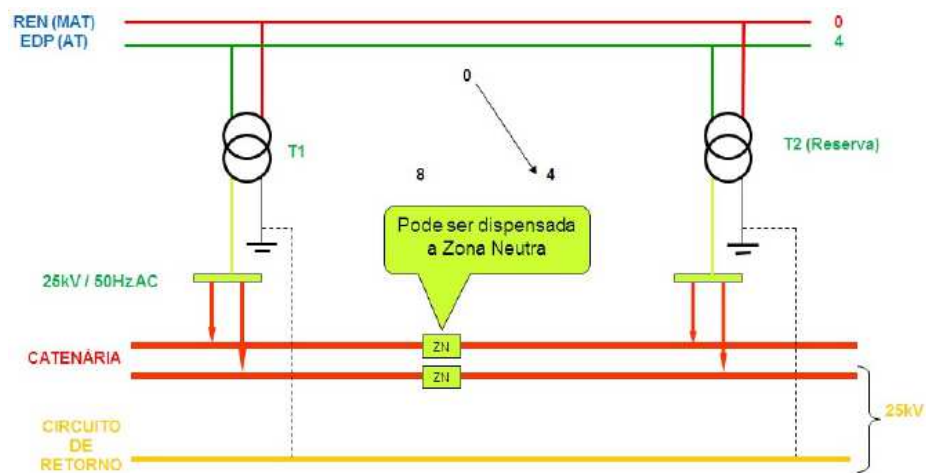


Figura 3.2 - Esquema de princípio da ligação bifásica.

O diagrama funcional apresentado na Figura 3.3 permite identificar os diversos componentes que constituem este tipo de instalação.

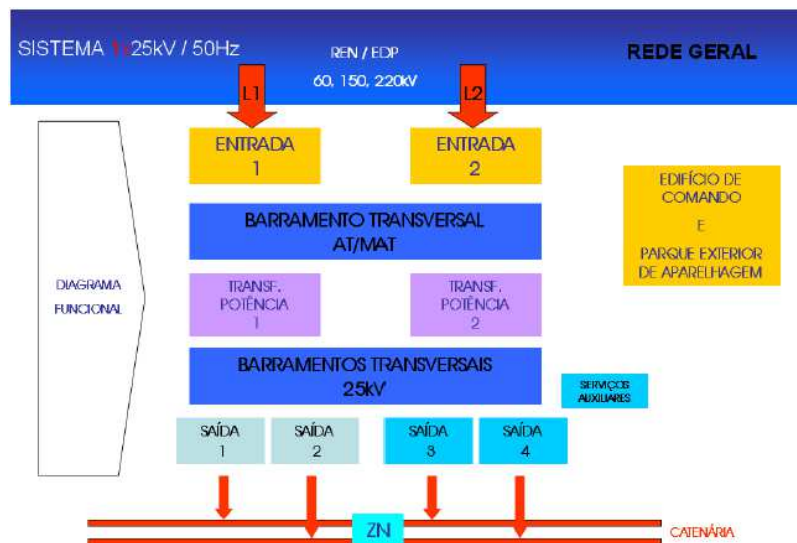


Figura 3.3 - Diagrama funcional da ligação bifásica.

3.1.2 Subestações 1x25kV - Ligação Trifásica ou em “V”

As subestações com ligação em “V” possuem três transformadores de potência, em que dois funcionam em ligação “V” e o terceiro como reserva que pode fazer o serviço de qualquer dos outros dois [4, 9].

Na ligação em “V” cada transformador é alimentado por duas fases, sendo uma comum aos dois transformadores, daí a designação em “V”. Cada transformador alimenta um sector de catenária e pode funcionar independentemente do outro estar ou não ao serviço.

Com esta ligação procura-se provocar um menor desequilíbrio na rede primária.

O desfasamento entre tensões secundárias é de 60° , equivalente a uma diferença de potencial de 25 kV entre elas.

Neste tipo de ligação é obrigatório existir uma zona neutra em frente à subestação para a separação de fases provenientes dos dois transformadores de potência, pois como é óbvio as tensões encontram-se desfasadas e caso esta zona neutra não existisse seria provocado um curto-circuito.

A Figura 3.4 apresenta uma configuração com alimentação trifásica. Neste caso é obrigatório existir uma zona neutra em frente à subestação para separação de fases provenientes dos 2 transformadores que se encontrarem em serviço.

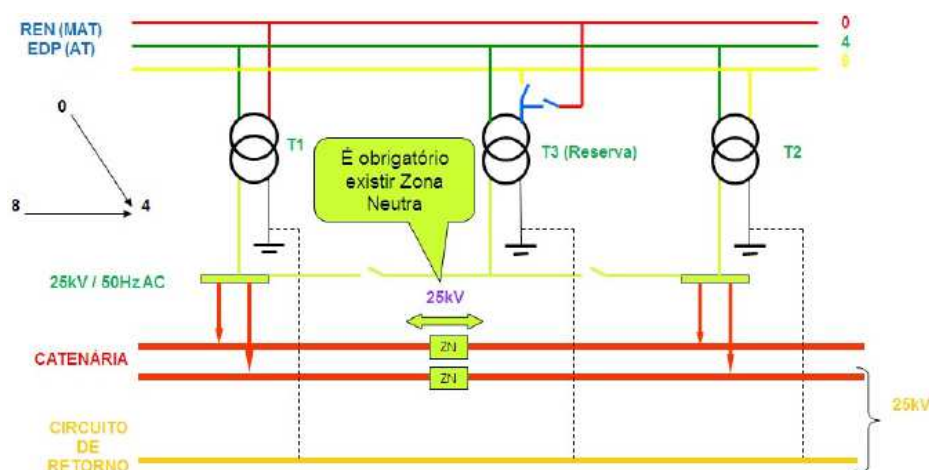


Figura 3.4 - Esquema de princípio da ligação trifásica em “V”.

A Figura 3.5 exemplifica do esquema unifilar de uma subestação de tração alimentado no sistema 1x25 kV [10].

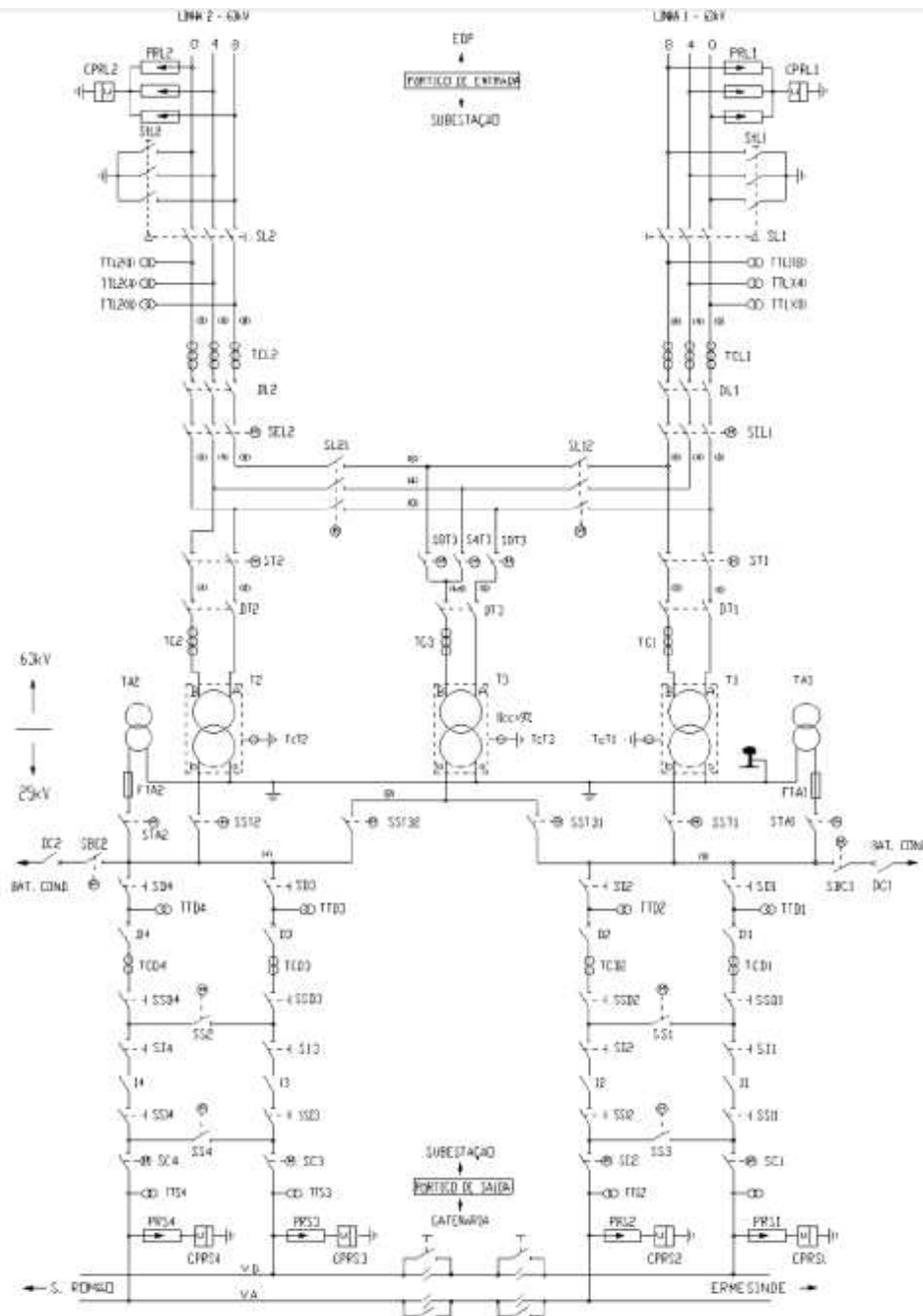


Figura 3.5 - Esquema unifilar da subestação da Travagem (1x25kV).

3.2 Subestações 2x25 kV Ligação Bifásica + Autotransformadores

Existem 3 subestações de tração para o sistema 2x25 kV em Portugal como se pode verificar na Tabela 3.2.

- Permite maiores distâncias entre subestações (60 a 100 km).
- Existem Postos de Autotransformadores de 10 km a 15 km ao longo da rede que interligam a catenária com o *feder*.
- Menor queda de tensão na catenária.

Tabela 3.2 – Subestações 2x25 kV.

Subestação	Alimentação	Tipo ligação dos transformadores	Potência instalada (MVA)	Ano de entrada ao serviço
Mortágua	Bifásica 220 kV	Bifásica 2x25 kV	16,2	1996
Gouveia	Bifásica 220 kV	Bifásica 2x25 kV	16,2	1996
Sobral	Bifásica 220 kV	Bifásica 2x25 kV	16,2	1997

Este tipo de ligação tem uma extensão de catenária de aproximadamente 202 km, e é constituído por um conjunto de três subestações idênticas, onde diferem apenas as fases de alimentação [4, 9].

Este sistema aplica-se quando as fontes de fornecimento de energia da rede primária se encontram a distâncias consideráveis e que, portanto, necessitam de um menor número de subestações.

As subestações são alimentadas por duas linhas bifásicas em MAT a 220 kV 50Hz (tensão composta), não sendo permitido o seu funcionamento em paralelo.

Cada uma das subestações possui dois transformadores de potência de 16,2 MVA com relação 220/2x25 kV, um transformador ao serviço e ficando o outro de reserva em situação normal de exploração.

Os transformadores possuem ponto médio no enrolamento secundário, permitindo obter duas tensões secundárias (2x25 kV), cujos terminais são ligados, um à catenária e outro a um cabo alimentador designado “*feeder*”, sendo o ponto médio do transformador ligado ao carril, de modo a permitir a utilização de material motor habitualmente usado no nível de tensão dos 25 kV.

Toda a aparelhagem de corte/seccionamento no lado de 25 kV é bipolar (catenária + *feeder*).

A ligação elétrica da catenária com o *feeder* é efetuada apenas através dos enrolamentos de autotransformadores colocados ao longo da linha, distando entre si entre 10 a 15 Km.

O conjunto catenária / *feeder* / autotransformadores garante uma impedância de linha de cerca de 0,19 ohm/km, bastante inferior aos valores de impedância do sistema clássico (0,5 ohm/km - via única e 0,3 ohm/km - via dupla). Deste modo, para uma determinada corrente de serviço a queda de tensão é menor o que permite

um maior afastamento entre subestações reduzindo o seu número num dado troço de linha.

Cada autotransformador é constituído por um enrolamento com ponto médio ligado ao carril. As duas extremidades são ligadas uma à catenária e outra ao *feeder*.

A finalidade do autotransformador é fazer com que a corrente de retorno circule pelo *feeder* (-25 kV) e não pelo carril.

Na Figura 3.6 está representada o princípio de funcionamento do sistema.

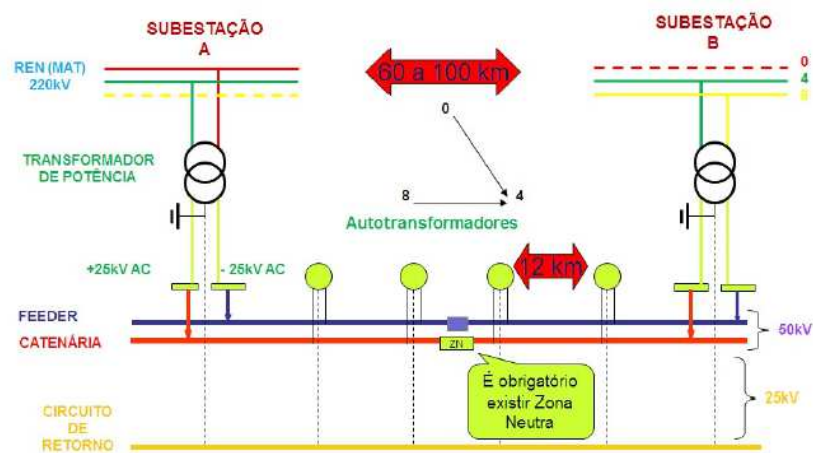


Figura 3.6 - Esquema de princípio do Sistema 2x25 kV.

O diagrama funcional apresentado na Figura 3.7 permite identificar os diversos componentes que constituem este tipo de instalação.

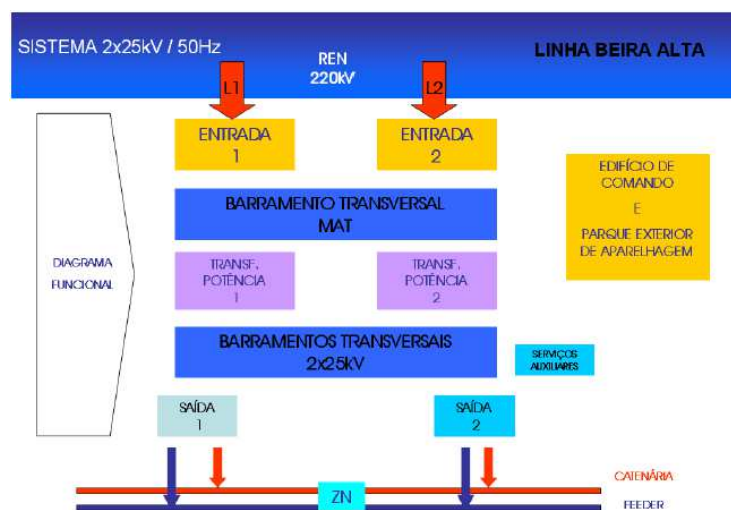


Figura 3.7 - Diagrama funcional das SST no sistema 2x25 kV.

3.3 Zonas Neutras entre Subestações

Zona neutra é um pequeno troço de catenária sem tensão (da ordem da dezena de metros) que serve para separar eletricamente as duas fases da corrente de alimentação provenientes da mesma subestação ou de duas subestações diferentes. Abreviadamente designa-se por ZN [4, 9, 11].

Por regra a cada subestação de tração encontra-se associada uma zona neutra por via (conceito tradicional de alimentação bifásica a 90°). Entre duas subestações de tração contíguas, existe sempre uma zona neutra. Quando as subestações são do tipo “monofásico” pode dispensar-se a construção de uma zona neutra. Em determinadas situações e para uma melhor exploração da linha eletrificada é recomendado construir zonas neutras associadas a subestações deste tipo. Uma zona neutra é construída de tal forma que permite a passagem aerodinâmica de todos os pantógrafos das unidades motoras sem qualquer imposição de ordem mecânica e determina uma imposição de ordem elétrica, que é a obrigatoriedade de desligar o disjuntor da unidade motora.

Na eventualidade de uma subestação ser colocada fora de serviço, o troço de catenária associado a esta será alimentado pelas subestações colaterais, eliminando assim esta zona neutra. Mesmo que as fases que alimentam os dois transformadores de potência fossem as mesmas, eliminando assim o desfasamento entre as duas tensões, seria necessária a existência de uma zona neutra, de modo a impedir a circulação de uma corrente residual entre as duas subestações.

As locomotivas devem atravessar este troço de catenária com o disjuntor de alimentação da unidade motora desligado, para que não se estabeleça um arco elétrico entre a zona alimentada e a zona neutra.

A Figura 3.8 apresenta uma configuração com duas subestações bifásicas em que existem 2 transformadores de potência, um em cada subestação, alimentados por fases diferentes, cada um alimentando o seu sector de catenária.

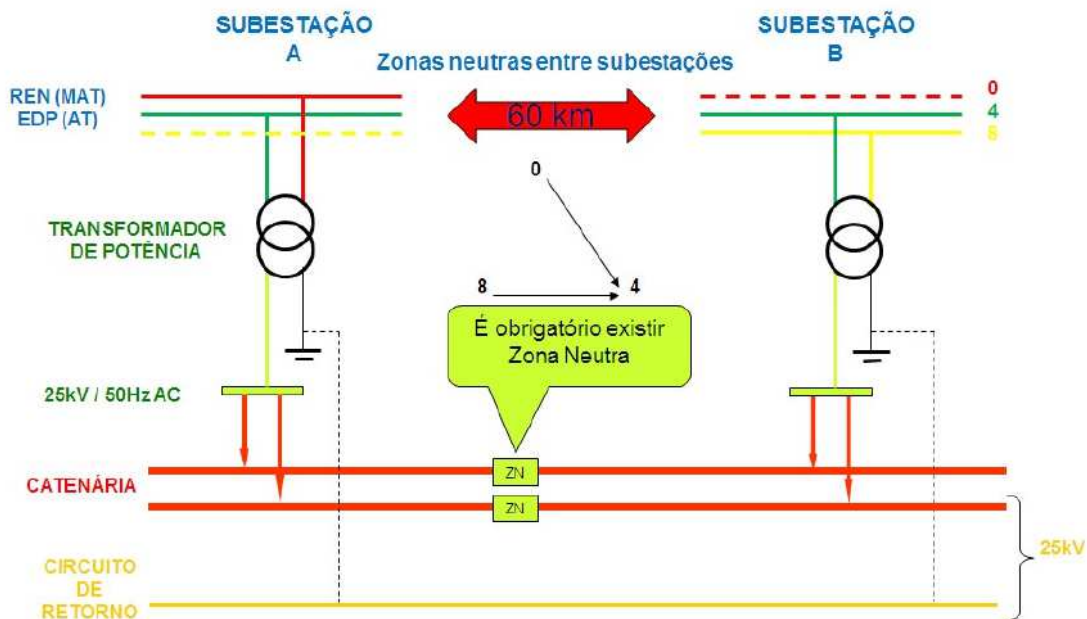


Figura 3.8 - Esquema das zonas neutras entre subestações.

Existem três tipos de zonas neutras instaladas:

3.3.1 Zona neutra convencional

Em cada uma das extremidades existe um seccionamento de lâmina de ar (duas catenárias em paralelo com seccionadores de socorro, que no estado normal se encontram abertos), cada pantógrafo toca em simultâneo nas duas catenárias sendo uma a da zona neutra e a outra alimentada por uma subestação (Figura 3.9).



Figura 3.9 - Zona neutra convencional.

3.3.2 Zona neutra com isolador de secção

Este tipo de construção é realizado através da montagem de dois isoladores de secção distanciados de 30 m e simetricamente montados em relação a um poste

central, em pontos de desalinhamento nulo tendo uma construção mais simples que a convencional (Figura 3.10).

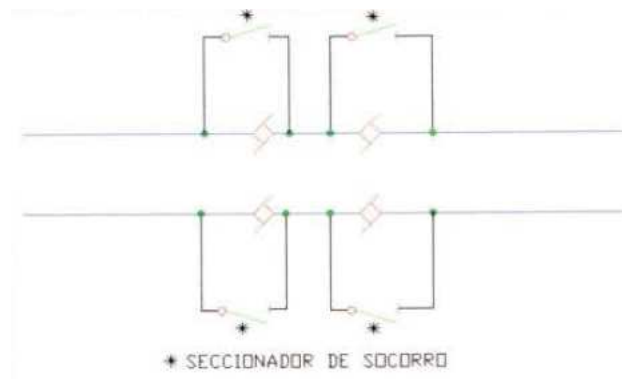


Figura 3.10 - Zona neutra com isoladores de secção.

3.3.3 Zona neutra seccionada

Consiste em dois troços de catenária isolados, descentrados e paralelos, permitindo velocidades até 220 km/h. Deve obrigatoriamente ser montada em alinhamento reto (Figura 3.11).

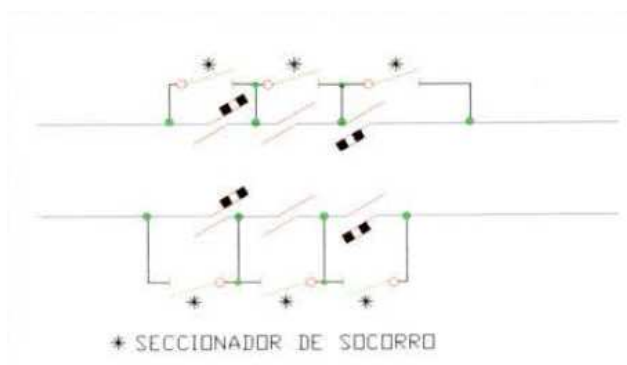


Figura 3.11 - Zona neutra seccionada.

3.3.4 Desfasamentos

O valor absoluto dos desfasamentos possíveis entre subestações tem valores fixos: 0°, 60°, 120°, ou 180° elétricos (Tabela 3.3).

O valor normal eficaz da tensão de alimentação à catenária como 27,5kV, a cada um destes desfasamentos equivale uma tensão também fixa, respetivamente: 0kV, 27,5kV, 47,6kV e 55kV.

Tabela 3.3 – Tabela de características das zonas neutras.

Tipo de ZN	Tensão máxima	Desfasamento máximo
Convencional	47,6 kV	120 ⁰
Seccionada	55 kV	180 ⁰
Isoladores de Secção	27,5 kV	60 ⁰

3.4 Desequilíbrios na Rede Trifásica de alimentação (a montante)

Um dos requisitos na escolha no tipo de sistema de alimentação são os efeitos na rede trifásica de alimentação, efeitos como as assimetrias, as oscilações e a energia de retorno.

Para transformar a corrente trifásica numa tensão simples de 25 kV é necessário recorrer à transformação monofásica. Como consequência desta transformação está a produção de um desequilíbrio nas linhas trifásicas de alimentação. Por forma a minimizar este desequilíbrio, a instalação sucessiva de subestações requer a alternância de fases em cada subestação, ou seja, a subestação “A” utiliza as fases 1 e 2, a subestação “B” utiliza as fases 1 e 3, a subestação “C” utiliza as fases 2 e 3 e assim sucessivamente.

Esta alternância obriga o estabelecimento de zonas neutras na catenária, entre subestações, de modo a evitar o curto-circuito entre fases diferentes.

As disposições e combinações de seccionamento das subestações de tração permitem minimizar o problema dos desequilíbrios das cargas.

Consoante a forma de ligação dos transformadores de potência nas subestações de tração, existirão diferentes níveis de desequilíbrio sobre a rede trifásica de alimentação, existindo essencialmente três tipos de ligação, dois dos quais abordados neste capítulo, “Direta”, em “V” e “Scott” (Figura 3.12).

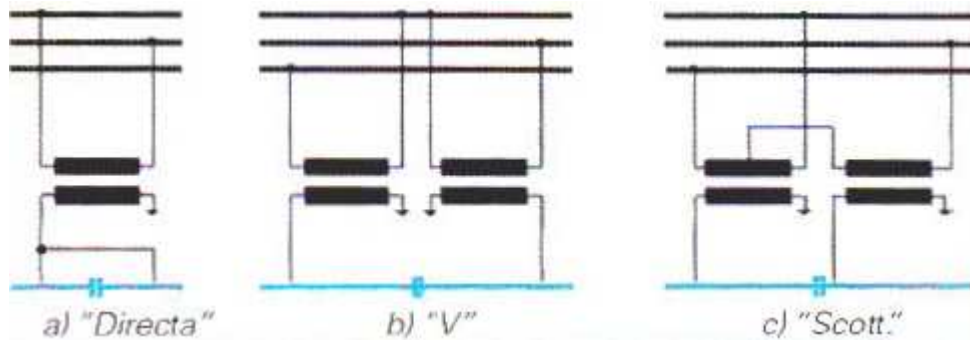


Figura 3.12 - Tipos de ligação dos transformadores das subestações de tração.

O desequilíbrio das linhas trifásicas neste tipo de instalações é admissível quando a relação entre a potência monofásica instalada e a potência de curto-circuito no ponto de entrega do distribuidor for menor que 0,5% [7, 12].

3.5 Sistema de proteções

Para cada um dos barramentos das entradas existe:

- Proteção de máximo/mínimo de tensão.
- Proteção de máximo de corrente e defeitos resistivos.
- Proteção homopolar e sobrecarga.
- Proteção de máximo/mínimo de frequência.

Por cada linha de alimentação e de forma a isolar defeitos na rede da EDP existe a possibilidade desta, por teledisparo, provocar a abertura dos disjuntores das entradas das subestações. Esta ordem só é cumprida quando confirmada pela atuação da proteção de mínima tensão EDP instalada juntamente com as proteções das subestações de tração.

O sistema de proteção utilizado pela EDP relativo às linhas de alimentação compreende nomeadamente:

- Proteção de distância.
- Proteção de máxima intensidade por fase.
- Proteção direcional de terra.

Existem também as proteções de sobrecarga dos transformadores, sobrecarga de catenária, inversão de potência, mínimo impedância e máxima intensidade.

Ao nível dos 25 kV a habitual proteção de sobreintensidade e mínimo impedância é assegurada pelo relé do tipo PDZI. Existe ainda outra proteção de máxima intensidade, denominada de segurança, tipo SPAJ 140C.

Relativamente aos transformadores temos as proteções de termóstato, Buchholz, imagem térmica e sobrepressão [7, 13].

3.6 Descrição de uma subestação

Subestação de Irivo:

A alimentação da SST de Irivo faz-se diretamente por dois barramentos bifásicos a 220 KV a partir do Posto de Corte de Urrô, da Rede Elétrica Nacional da EDP, construído para o efeito ao lado desta subestação. A potência de curto-circuito à entrada desta SST atinge um valor máximo de $P_{CC}=7000$ MVA [6].

Esta subestação é constituída por uma plataforma, devidamente vedada e sinalizada, na qual se distribui o equipamento de exterior, de seccionamento, de transformação e de alimentação à catenária, montado sobre estruturas metálicas. Tem ainda um edifício constituído por sala de comendo, compartimentos para telecomunicações e áreas de apoio diversas.

A instalação de alta tensão é seccionada em unidades funcionais ditas “painéis”, sendo o “Painel Linha” para as chegadas e “Painel Transformador” para alimentação dos transformadores. Os painéis “transformador” ligam sobre um coletor comum, designado por “Jogo de Barras” ou “Painel Barras”, no qual circula toda a potência que alimenta a subestação.

A partir do barramento de 25 kV derivam os “painéis” que alimentam a catenária. Cada painel comporta os elementos de interrupção em carga e disparo automático (disjuntores), e os elementos de interrupção em vazio que permitem colocar qualquer painel fora de tensão (seccionadores).

Por cada um dos painéis elétricos acima referidos existem as correspondentes unidades seccionadas em baixa tensão, que garantem o comando, a sinalização, a medida e o controlo desses mesmos painéis, instaladas no edifício de comando da subestação.

O equipamento de 220 kV, necessário à alimentação dos dois transformadores de potência monofásicos de 20 MVA 220/27,5 kV, e interligação das duas linhas de alimentação é o seguinte:

- 6 Seccionadores bipolares 220 kV / 800 A;
- 4 Transformadores de tensão;
- 6 Transformadores de intensidade;
- 2 Disjuntores bipolares EM SF6 220 kV / 800 A;
- 4 Descarregadores de sobretensão equipados com contadores de descargas.

Para minimizar os efeitos das variações de tensão primária, têm implementado, do lado do primário, regulação de tensão em carga. Têm ainda proteções próprias que farão atuar o disjuntor afeto a cada aparelho.

Do lado secundário, de 25 kV, está distribuído pelo parque exterior o seguinte equipamento para a alimentação da catenária:

- 2 Transformadores de potência monofásica para os serviços auxiliares;
- 15 + 14 Seccionadores monoplares 25 kV / 1250 A;
- 3 Disjuntores monoplares EM SF6;
- 4 Interruptores monoplares EM SF6 25 kV / 1600 A;
- 7 Transformadores de tensão;
- 3 Transformadores de intensidade;
- 4 Descarregadores de sobretensão equipados com contadores de descargas

3.7 Conclusões

As SST estão criteriosamente localizadas, garantem o fornecimento de energia à catenária a partir da rede do distribuidor público. Cada subestação alimenta usualmente, para o sistema típico de 25 kV 50 Hz, dependendo do sistema de alimentação, troços eletrificados que podem chegar aos 50 km, no caso do sistema 2x25 kV, para cada lado da subestação de tração.

Neste capítulo efetuou-se uma abordagem às subestações de tração, caracterizando-as quanto ao seu tipo de alimentação (1x25 kV ou 2x25 kV) e quanto ao seu tipo de ligação (ligação em “V” ou ligação bifásica para o sistema 1x25 kV e ligação bifásica para o sistema 2x25 kV).

Foram descritas as zonas neutras, a sua finalidade e foram identificados os diferentes tipos existentes. Foi feita uma análise aos desequilíbrios provocados pelas SST na rede trifásica de alimentação (a montante).

Por fim, descreveu-se o sistema de proteções existente nas subestações de tração e título de exemplo foi descrita a SST de Iribo, mencionando os principais constituintes.

Capítulo 4

Tipos de alimentação da catenária

4.1 Catenária

A catenária é um sistema de distribuição e alimentação elétrica aérea, é a designação do conjunto de condutores de energia desde as subestações de tração até aos pantógrafos das unidades motoras. O retorno da corrente de tração é normalmente assegurado pelos carris de rolamento e pelas camadas condutoras, tema que será abordado no Capítulo 5.

O nome catenária deriva da configuração do cabo de suporte, dado que, por definição, catenária é o lugar geométrico dos pontos de um cabo suspenso pelas suas extremidades.

A catenária, em função do tipo de velocidades previstas para cada troço, tem algumas particularidades de montagem, sendo do tipo LP1, para velocidades até 120 Km/h, LP2 até 140 Km/h, LP3 até 160 km/h, LP4 até 200 km/h, LP5 com a possibilidade de atingir os 220 km/h [6, 8, 10].

4.1.1 Constituição da catenária

A catenária das vias principais é composta por [14]:

- Um cabo de suporte (C.S.) de 65 mm² de secção constituído por 19 fios de bronze (liga de cobre e estanho) de 60% de condutibilidade relativamente à do cobre padrão.
- Os fios são enrolados em hélice, sendo a primeira camada constituída por sete fios, e uma outra de doze fios enrolados em sentido inverso.

- O seu diâmetro exterior é de 10,5 mm e a sua carga de rutura à tração é de 4214 daN e pesa 0,615 kg/m. Um fio de contacto (F.C.) de 107 mm² de secção, em cobre duro eletrolítico (98% de condutibilidade). Apresenta 12,24 mm de diâmetro e comporta duas ranhuras longitudinais destinadas à fixação das “griffes” para pêndulos deixando livre a parte inferior onde o pantógrafo deslizará suavemente.
- A sua carga de rutura à tração é de 3.905 kg e o seu peso é de 0,950 kg/m.
- A secção de cobre padrão equivalente a estes condutores é de 39 mm² para o cabo de suporte (C.S.) e 105 mm² para o fio de contacto (F.C.).
- O total do cobre padrão será no conjunto de 144 mm².
- O fio de contacto é suspenso do cabo de suporte por meio de pêndulos. A distância máxima entre dois pêndulos consecutivos é de 9 m nas vias principais e 12 m nas vias secundárias.
- O peso médio do conjunto desta catenária é de 1,6 kg/m.

4.1.2 Postos de catenária

No sistema 25 kV 50 Hz, as subestações de tração alimentam radialmente os troços de catenária à sua esquerda e à sua direita. Esses troços, nomeados “setores de catenária”, são apenas alimentados a partir de uma subestação de tração, devido à empresa fornecedora de energia proibir o paralelo das suas subestações alimentadoras através de uma eventual malha de rede elétrica do cliente [8, 15].

A alimentação radial dos setores de catenária necessita da existência de postos que efetuam o seccionamento da catenária ou das catenárias para um lado e para o outro da subestação, por razões de exploração e/ou manutenção. Estes postos de seccionamento, nomeados “Postos de Catenária” permitem então, no caso de uma eventual avaria ou remodelação, o corte de alimentação apenas na zona que efetivamente o justifique.

São postos cuja aparelhagem (interruptores ou disjuntores) é sempre telecomandada a partir do Posto de Telecomando e podem classificar-se segundo as suas funções:

Postos de subseccionamento (SS) - são postos que estão eletricamente ligados a um seccionamento de lâmina de ar (ou isoladores de secção) e realizam a operação de continuidade longitudinal.

Postos de subseccionamento e paralelo (SSP) - são postos que estão eletricamente ligados a um seccionamento de lâmina de ar (um em cada via) e realizam em cada uma delas a operação de continuidade longitudinal. A operação de paralelo transversal é feita geralmente de lado da subestação.

Postos de seccionamento e paralelo (SP) - são postos que estão eletricamente ligados a zonas neutras entre subestações. Permitem realizar a continuidade longitudinal a montante e jusante da zona neutra (operação que se realiza em exploração normal) e a operação de paralelo transversal para cada um dos lados.

Postos de ramal - são postos que permitem realizar a operação de alimentação de linhas desviadas em relação a entroncamentos de linhas ou ramais importantes. Por vezes estes postos podem permitir a operação de paralelo transversal.

Posto de barramento - são postos onde várias secções elementares são ligadas a um barramento através de interruptores. Em bifurcações ou em entroncamentos permitem realizar as operações de paralelo transversal e alimentação de linhas desviadas, realizando por vezes também a operação de continuidade longitudinal.

4.2 Alimentação da catenária

O primeiro troço a ser eletrificado foi a Linha de Cascais, a 15 de agosto de 1926, com uma tensão de 1,5 kV em corrente contínua. A eletrificação do restante rede só teria início nos anos 1950, com uma tensão 25 kV corrente alternada, principalmente devido a problemas de fornecimento da tensão necessária pela rede pública e de modo a minimizar as perdas na catenária [8, 10, 16].

Este nível de tensão faz uso da frequência industrial, permitindo assim uma interligação direta entre as subestações da rede de transporte de energia e as subestações de tração. O valor de 25 kV é suficientemente elevado para permitir o transporte de elevadas potências com correntes relativamente moderadas (200 A para 5 MVA), contribuindo deste modo para a redução da secção equivalente da catenária e necessitando de isoladores de dimensões “aceitáveis”.

No sistema de 25 kV 50 Hz temos duas opções de alimentação da catenária, 1x25 kV e 2x25 kV, estas constam de:

- Alimentação da catenária em corrente alternada monofásica com tensão de 25 kV em relação ao carril, e frequência de 50 Hz;

- Cada secção da catenária alimentada por uma subestação, estando estas isoladas entre si através de uma zona neutra de separação, estando esta colocada geralmente equidistante entre as subestações;
- Alimentação das subestações de tração mediante duas fases do sistema trifásico da rede de alta tensão primária;
- Subestação equipada com transformadores com regulação automática de tensão de saída para a catenária, em função da carga monofásica e flutuação da tensão primária.

4.2.1 Alimentação 1x25 kV

Este sistema, designado como sistema convencional, é o mais utilizado nas redes ferroviárias com uma extensão de aproximadamente 1210 km de comprimento que representa 89% de implementação na rede eletrificada [4, 10, 16, 17].

No sistema de alimentação a 1x25 kV o primário do transformador de potência da subestação de tração é alimentado a duas fases da linha de transmissão, no lado secundário uma saída do transformador alimenta a catenária, e a outra liga à terra e ao sistema de retorno de corrente de tração.

A tensão que alimenta todas as cargas ao longo da catenária será de 25 kV, como se pode observar no esquema simplificado deste sistema na Figura 4.1.

Também é apresentado na Figura 4.1 a distribuição das intensidades de corrente (em função da corrente de carga i) pela catenária e pelo circuito de retorno da corrente de tração. Toda a corrente absorvida pelas cargas é conduzida para a subestação pelo circuito de retorno.

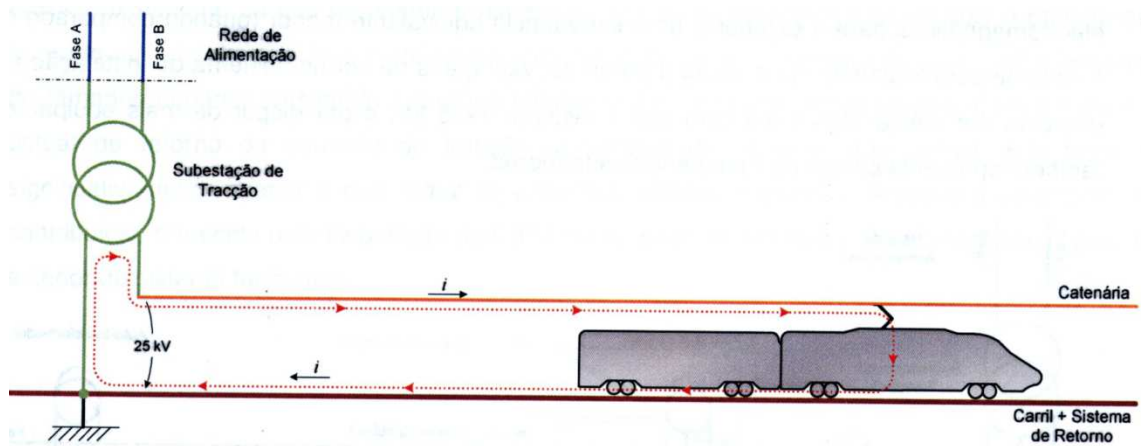


Figura 4.1 - Esquema do sistema 1x25 kV.

A Figura 4.2 apresenta o esquema unifilar do sistema 1x25 kV.

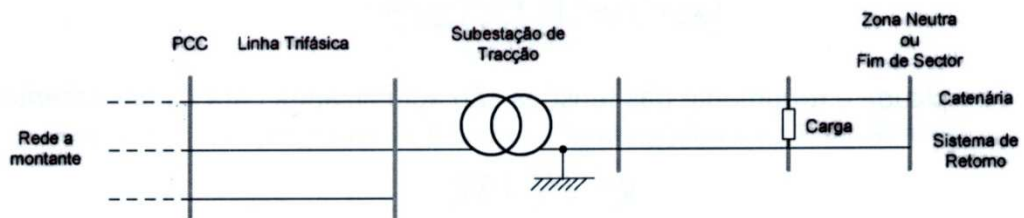


Figura 4.2 - Unifilar do sistema 1x25 kV.

Características principais do sistema:

- Subestações alimentadas em AT de 63 a 220 kV;
- Distância entre subestações até 60 km;
- Zonas neutras na catenária entre subestações;
- Alimentação em ponta a 30 km;
- Desequilíbrios na rede de AT.

4.2.2 Alimentação 2x25 kV

Uma variante do sistema 25 kV 50 Hz é o sistema 2x25 kV, igualmente à frequência industrial. A extensão de catenária alimentada é de aproximadamente 202 km que representa 9% de implementação na rede eletrificada [4, 10, 16, 17].

Este sistema implica a utilização de transformadores de potência, nas subestações de tração, com uma tensão secundária de 50 kV, cujos terminais são ligados, um à catenária e o outro a um cabo alimentador designado *feeder* sendo o ponto médio do transformador ligado ao carril, de modo a permitir a utilização do material motor habitualmente usado, alimentado ao nível de tensão de 25 kV. Este

sistema requer a instalação de autotransformadores (Figura 4.3) ao longo da via, espaçados de 10 a 15 km, igualmente com o ponto medio ligado ao carril, para efetuar a ligação elétrica entre a catenária, *feeder* negativo e o sistema de retorno.

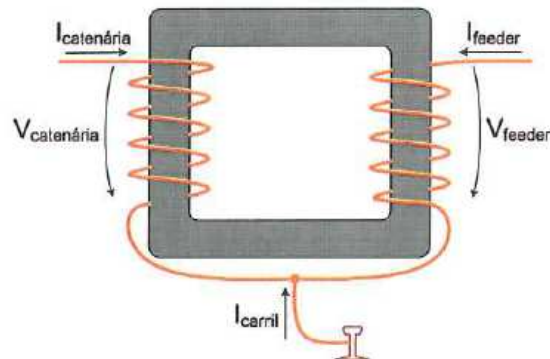


Figura 4.3 -Autotransformadores.

Pelo *feeder* circula uma corrente igual mas contrária à que circula na catenária, nos troços exteriores onde não se encontra a locomotiva, assim, anulam-se mutuamente os efeitos indutivos da corrente que circula na catenária e os da corrente que circula no *feeder*. Devido ao *feeder* negativo e ao efeito dos autotransformadores, existe uma redução substancial de circulação de corrente de retorno pelo circuito de retorno.

Como a catenária e o *feeder* evoluem ao longo da via, no topo dos postes da catenária, o sistema 2x25 kV permite minimizar os problemas de interferência eletromagnética sobre as linhas de telecomunicações que eventualmente evoluam na proximidade.

Na Figura 4.4 apresenta-se o esquema simplificado do sistema 2x25 kV e uma distribuição aproximada da intensidade de corrente da carga i pelos diversos condutores.

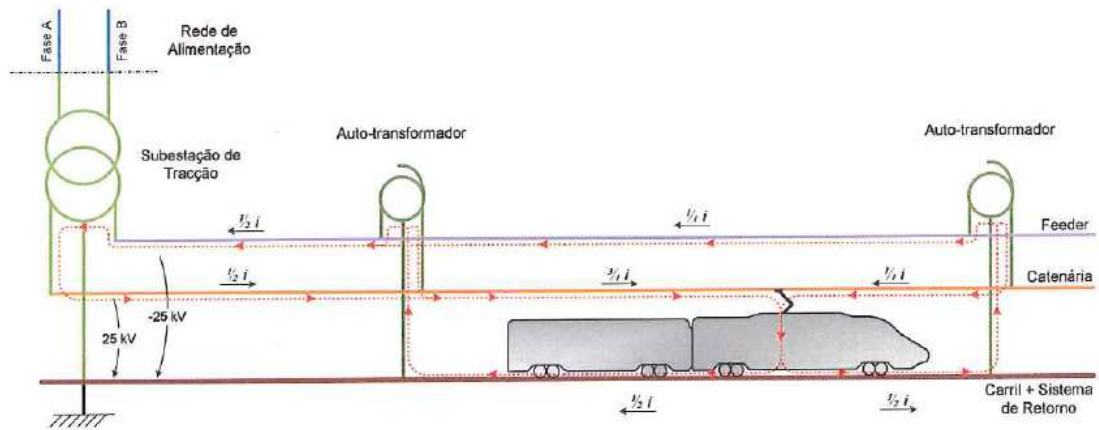


Figura 4.4 - Esquema do sistema 2x25 kV.

A Figura 4.5 apresenta o esquema unifilar do sistema 1x25 kV.

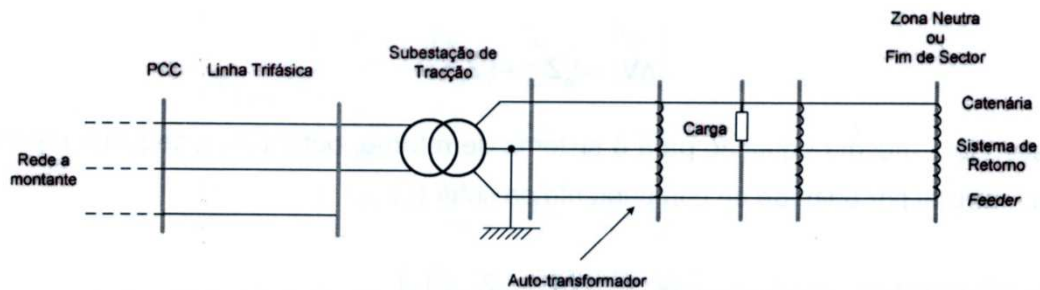


Figura 4.5 - Unifilar do sistema 2x25 kV.

Vantagens deste sistema:

- Permitir o transporte de maior quantidade de energia (ideal para as redes de alta velocidade);
- Maior distância entre subestações;
- Menor emissão de radiações eletromagnéticas para o exterior;
- Menor impedância equivalente (comparado com o sistema convencional);
- Preço kWh AT/MAT é mais baixo;
- Menor corrente nos carris;
- Perdas reduzidas nos carris.

Desvantagens:

- Sistema de instalação mais onerosa (média 25% superior);
- Equipamento apresenta maiores custos de manutenção superiores;
- Provoca desequilíbrios na REN/EDP.

Características principais deste sistema:

- Subestações alimentadas a AT de 220 kV;

- Distância entre subestações até 100 km;
- Autotransformadores a cada 10 a 15 km;
- Alimentação em ponta a 30 km;
- Zonas neutras a cada 30 km;
- Desequilíbrios na rede de alimentação trifásica;
- Menores quedas de tensão na catenária em comparação com o sistema 1x25 kV;
- Catenárias em paralelo e através dos autotransformadores;
- Menores perturbações com outros sistemas.

4.2.3 Comparação entre os sistemas de alimentação

Comparando estes dois sistemas, convencional e 2x25 kV, quanto ao rendimento energético, conduz a resultados semelhantes. Se, por um lado, no sistema 2x25 kV a energia é transmitida a 50 kV (dobro da convencional) a uma distância máxima não superior ao dobro da distância no sistema convencional (o número de subestações reduz-se tipicamente numa proporção de 1,7 para 1 e 2 para 1), por outro lado as perdas no circuito de retorno são maiores no sistema 2x25 kV. Com efeito, o *feeder* apresenta uma impedância de aproximadamente 0,2 W/km enquanto que no sistema convencional, grande parte da corrente de retorno passa através da terra, o que corresponde a uma impedância equivalente (de retorno) de 0,01 W/km.

Quanto ao custo de instalação o sistema 2x25 kV é mais oneroso (média 25% superior) e o equipamento apresenta maiores custos de manutenção também quando comparado com o sistema 1x25 kV.

O sistema convencional tem uma extensão de aproximadamente 1210 km de comprimento que representa 89% de implementação na rede eletrificada, já a extensão de catenária alimentada a 2x25 kV é de aproximadamente 202 km que representa 9%. Os restantes 2% são alimentados no sistema cc a 1500 V.

4.3 Conclusões

Na boa tradição francesa que inspirou o arranque da eletrificação da Rede Ferroviária Portuguesa, adotou-se na área em causa, uma catenária do tipo tradicional, alimentada a 25 kV 50 Hz.

O sistema 1x25 kV consiste na ligação do primário do transformador a duas fases da linha de alta tensão e o secundário à catenária e ao carril. Como as fases não

podem estar ligadas em paralelo existe uma zona neutra nos extremos dos dois troços de catenária.

O sistema 2x25 kV aplica-se quando as fontes de fornecimento de energia da rede primária se encontram a distâncias consideráveis precisando de um menor número de subestações. O primário é alimentado tal como no sistema 1x25 kV e o secundário possui uma tomada intermédia que é ligada ao carril de retorno e à terra.

Neste capítulo foi feita uma abordagem aos tipos de alimentação da catenária, descrevendo o conceito de catenária e os seus principais constituintes. Foram caracterizados os dois sistemas de alimentação (1x25 kV e 2x25 kV), descrevendo a sua constituição, as características principais e apresentando os seus esquemas de ligação.

Por fim foram comparados estes dois sistemas de alimentação da catenária.

Capítulo 5

Retorno de corrente de tração

5.1 Constituição do sistema

Nos capítulos anteriores foi descrito uma parte do circuito elétrico necessário para a tração elétrica. O sistema de retorno de corrente de tração à subestação é mais uma parte indispensável.

Originalmente o retorno da corrente captada pelos comboios à subestação era realizado pelo carril e também pela terra devido ao baixo isolamento entre os carris e a terra resultante de longo comprimento de contacto de ambos. O isolamento entre carril e terra é possível mas não desejável por existir a possibilidade de provocar tensões carril - terra elevadas que podem colocar em risco a segurança das pessoas.

Atualmente o sistema de retorno de corrente de tração é constituído, além do carril e da terra, por um conjunto de condutores: cabo de terra enterrado (CdTE), cabo de terra aéreo (CdTA) e ligações equipotenciais que garantem a adequada condução da corrente de tração à subestação garantindo a segurança de pessoas e equipamentos. A evolução para este sistema foi originada por motivos de segurança e de compatibilidade eletromagnética.

O sistema de retorno de tração deve ser eletricamente contínuo e caso exista falha num condutor, esta não deverá conduzir a um funcionamento deficiente do sistema de tração e terras. Existem sempre dois caminhos independentes por cada via para o retorno de corrente de tração, critério da redundância. As ligações devem ser redundantes para prevenir a probabilidade de falta de continuidade no caso de

um cabo se partir. A continuidade elétrica do carril está representada na Figura 5.1 [4, 18, 19].

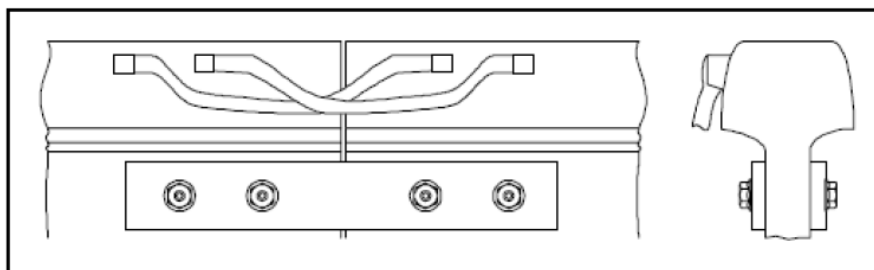


Figura 5.1 - Ligação redundante do carril.

5.1.1 Cabo de terra enterrado - CdTE

O CdTE é um cabo em cobre nu enterrado ao longo da via, instalado por baixo ou no caminho de cabos. Quando instalado em caminho de cabos (túneis, viadutos ferroviários ou pontes) este cabo será em alumínio do tipo LXV.

Funções:

- Dar a possibilidade de ligar objetos à terra;
- Providenciar uma ligação física com a “Terra Mãe”;
- Reduzir correntes de modo comum em blindagens de cabos, ligadas à terra em ambas as extremidades;
- Potenciar um valor de terra mais baixo, relativamente aos métodos tradicionais;
- Tirar partido do acoplamento magnético entre condutores de forma a reduzir o efeito dos campos perturbadores.

Aplicações:

- Todos os caminhos de cabos que contenham condutores metálicos;
- Pelo menos um cabo ao longo da via, mesmo que não existam cabos metálicos.

Propriedades:

- Secção - 50 mm²;
- Resistência elétrica - 0,3754/km;
- Suportar - 250 A em regime permanente, 50 Hz;
- Suportar - 7,5 kA em regime de curto-circuito (100ms).

5.1.2 Cabo de terra aéreo - CdTA

O CDTA é um cabo nu em alumínio-aço fixo aos postes da catenária através de uma pinça.

Funções:

- Proteção elétrica a postes e elementos de catenária;
- Garantir um caminho contínuo para a corrente de retorno até à subestação;
- Tirar partido do acoplamento magnético entre condutores de forma a reduzir o efeito dos campos perturbadores.

Aplicações:

- Ao longo de todo o sistema eletrificado.

Propriedades:

- O CdTA deve estar de acordo com as especificações da catenária aplicáveis. Uma vez que o CdTA é uma componente da especialidade de Catenária, será o projeto da mesma a especificá-lo;
- Terá de ser contínuo ao longo de toda a secção alimentada pela subestação correspondente;
- Na migração de um sistema de terras Tradicional para o Universal, os isoladores de CdTA são substituídos por mangas metálicas, eletricamente contínuas.

5.1.3 Ligações elétricas existentes

- Continuidade longitudinal - Fiadores (Via em barra curta).
 - Cabo de aço 95 mm².
 - Soldados ao carril.
 - São montados em pontos de descontinuidade elétrica, exemplo juntas de dilatação.
- Continuidade transversal.
 - Aparelhos de mudança de via.
 - Fiadores.
 - Continuidade entre vias principais e secundárias.
 - Fio nu (aço diâmetro 10, cu diâmetro 7), Cabo aço.

- Ligações Aéreo Enterrado (LEAE).
- Ligações Transversais Integrais (LTI).

O fecho do circuito de retorno da corrente de tração é feito pela:

- Ligação dos carris à subestação.

Nas Figuras 5.2 e 5.3 é apresentada a disposição dos cabos do sistema de retorno de corrente de tração e dos condutores em tensão para os sistemas já abordados anteriormente.

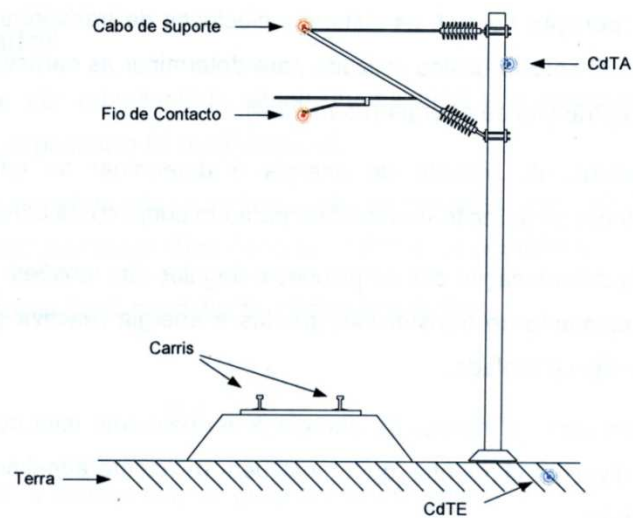


Figura 5.2 - Sistema 1x25 kV.

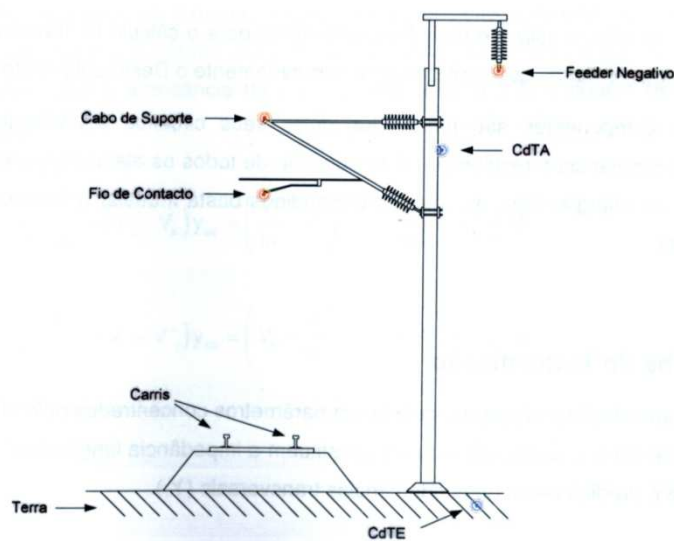


Figura 5.3 - Sistema 2x25 kV.

As estruturas metálicas sem tensão, dos postes de catenária, são ligadas à terra, utilizando-se para o efeito um cabo que interliga os postes, sensivelmente à cota da catenária (cabo de proteção aéreo (CdTA)). Alguns postes de catenária possuem uma baixada para um cabo de terra enterrado longitudinalmente ao lado da via, com um espaçamento máximo (entre postes com baixada de terra) de 800 m. Utiliza-se um cabo de proteção aéreo de Alumínio-Aço com 93 mm^2 , e um cabo de terra enterrado longitudinalmente de cobre com 50 mm^2 [4].

5.2 Sistema de retorno da corrente de tração

O objetivo de atuação do sistema de retorno de corrente de tração (RCT) é obter a maior utilização possível do carril como condutor desta corrente. Deste modo se evita que a corrente utilize os cabos de sinalização, o que pode causar interferências e danos no equipamento de sinalização e telecomunicações. Esta situação é especialmente crítica devido à alta componente de interferência harmônica quando se utiliza o freio de serviço que devolve energia ao sistema [4, 19].

Os campos eletromagnéticos criados na periferia do caminho-de-ferro, devido à malha indutora constituída (originalmente) pela catenária e pelo conjunto carril+terra, dependem da corrente que circula no sistema, da sua geometria e dimensão. Com as características do solo a parcela de corrente que circula pelo solo pode atingir profundidades maiores originando uma malha indutora de tamanho superior ampliando a área de influência do campo eletromagnético. Com o sistema atual de retorno de corrente de tração, a parcela de corrente que circula pela terra é significativamente inferior o que reduz as emissões magnéticas. Esta corrente pode atingir valores até 600 amperes em condições normais (e até 7500 amperes durante 100 milissegundos em condições de avaria / curto-circuito).

A corrente de retorno de tração é transmitida aos carris através das rodas da unidade de tração, depois é conduzida pelo caminho com menor resistência sendo partilhado entre os carris e os cabos ao longo da via como o cabo de terra aéreo (CdTA).

Existe um Normativo que a REFER criou, de RCT+TP (terras de proteção), que tem como objetivo providenciar as especificações de ligação à terra e de retorno da corrente de tração dos sistemas a 25kV e a necessidade imperativa de salvaguardar o cumprimento das Normas Europeias (Ex. EN50121, EN50122-1 “Tensão de contacto Máx=60V” e “Regime permanente 842V @ 100ms”).

Este sistema garante:

- Uma área segura no que diz respeito às tensões de passo e contacto, tanto para os passageiros como para os agentes que trabalham na via;
- Um sistema de ligação à terra compatível com os circuitos de via e outras instalações de sinalização e de telecomunicações;
- Um sistema de ligação à terra que obedeça às normas Europeias para as emissões em HF e proteção de pessoas e equipamentos;
- A proteção das estruturas de construção civil contra as influências das correntes de retorno de tração.

Atualmente em Portugal existem três sistemas de retorno de corrente de tração a 25 kV em funcionamento:

- Sistema tradicional (ST)
- Sistema com condutor de retorno (RT)
- Sistema com autotransformadores (AT)

5.2.1 Sistema tradicional (ST)

O sistema tradicional ou *standard* (Sistema ST) é um sistema simples e económico, este baseia-se apenas na utilização dos carris para a condução da corrente de retorno de tração como exemplifica a Figura 5.4.

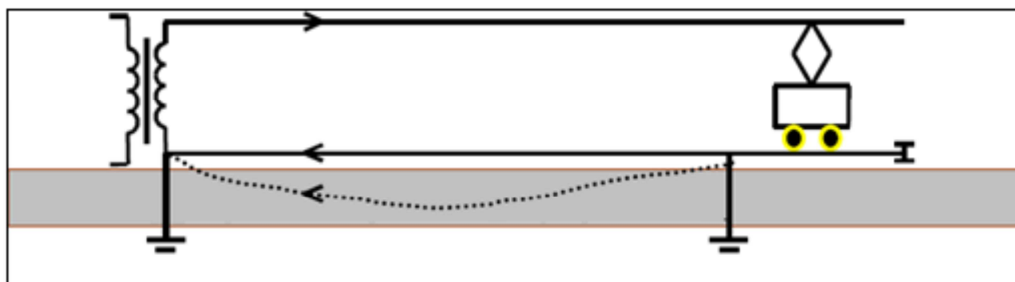


Figura 5.4 - Sistema tradicional.

O sistema ST apresenta algumas desvantagens, a impedância do sistema que é bastante elevada porque a corrente circula numa malha de grande dimensão [Subestação - (pela catenária) - Carga - (pelos carris) - Subestação]. Isto é, quanto mais distante da subestação de tração estiver o comboio (carga móvel) maior será a impedância total do sistema. Este facto limita a distância de fornecimento de energia. Outra desvantagem que um sistema deste tipo apresenta tem que ver com as elevadas tensões de contacto e de passo que não cumprem as normas EN50121 e

EN50122-1. Apresenta ainda uma maior interferência eletromagnética com os sistemas de sinalização e telecomunicação. Estas desvantagens condicionam assim a utilização do sistema *standard*, razão pela qual é um sistema muito pouco utilizado [4, 19].

Na Figura 5.5 está representada a distribuição do campo magnético no sistema *standard*.

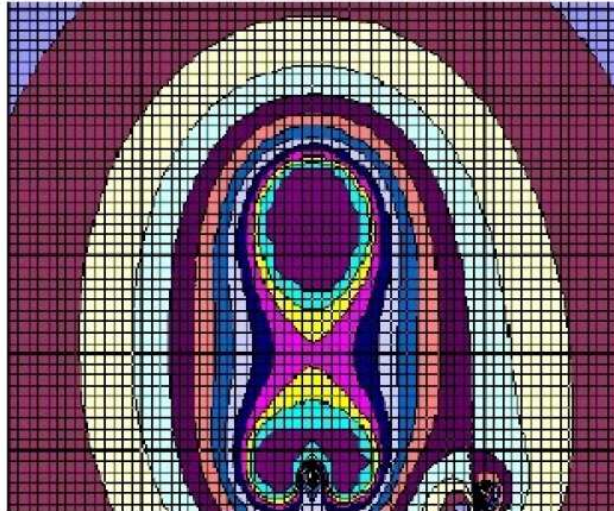


Figura 5.5 - Distribuição do campo magnético no sistema *standard*.

5.2.2 Sistema com condutor de retorno (RT)

O sistema com condutor de retorno (Sistema RT) tem como base os sistemas terra e de retorno da corrente de tração através do carril, cabo de terra aéreo (CdTA) e pelo menos um cabo de terra enterrado (CdTE). Os condutores de retorno encontram-se ligados entre si em intervalos regulares para assim possibilitar que a corrente de retorno se distribua pelos vários condutores, como como exemplifica a Figura 5.6.

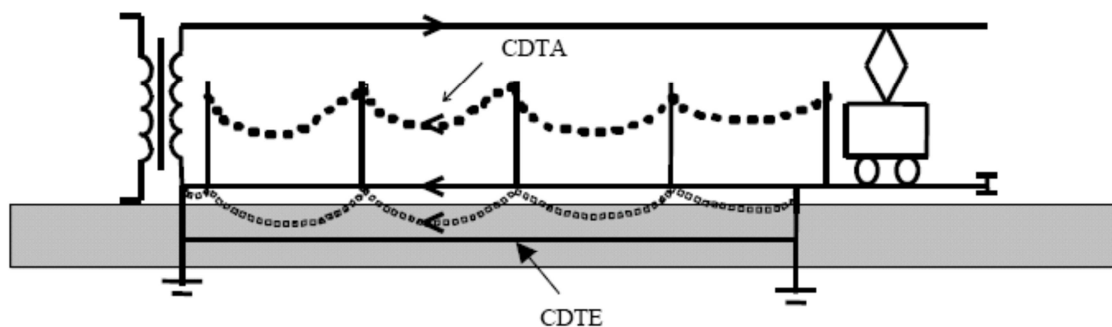


Figura 5.6 - Sistema com condutor de retorno.

O sistema RT possibilita a diminuição da impedância para a corrente de tração através da colocação do cabo de terra aéreo na proximidade da catenária, o acoplamento magnético mútuo entre o CdTA e a catenária reduz as interferências com os sistemas vizinhos. Com isto este sistema terá cerca de 20% da corrente de retorno a circular no CdTA reduzindo assim a quantidade de corrente que circula no solo, resultando um o campo magnético menor comparativamente com o sistema *standard* [4, 19].

Na Figura 5.7 está representada a distribuição do campo magnético no sistema com condutores de retorno.

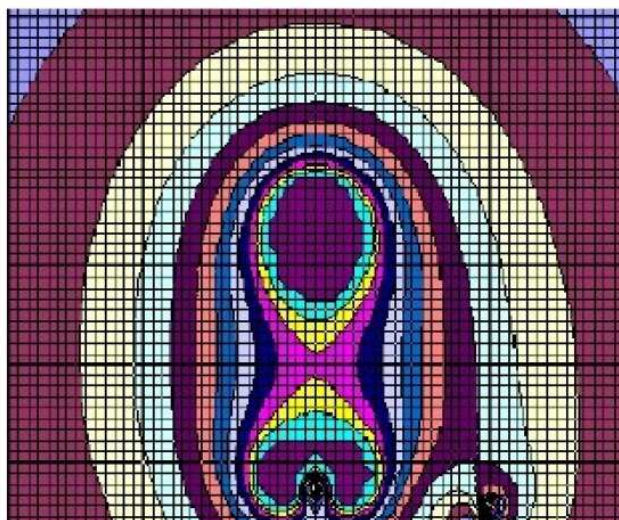


Figura 5.7 - Distribuição do campo magnético no sistema com condutor de retorno.

5.2.3 Sistema Autotransformador

O sistema autotransformador (Sistema AT) é recomendável para fornecimento e distribuição quando os valores de potência e distâncias são elevados. A subestação alimenta a catenária (F.C. + C.S.) a uma tensão de +25 kV mas, simultaneamente,

alimenta os postos autotransformadores através do *feeder* a uma tensão -25 kV, como como exemplifica a Figura 5.8.

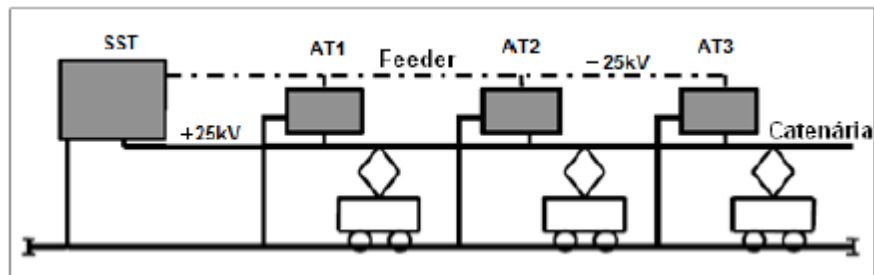


Figura 5.8 - Sistema autotransformador.

No sistema AT, a alimentação da carga é a 25 kV e o transporte de energia entre a subestação e os autotransformadores a uma tensão de 50 kV.

Assim quando uma composição ocupa uma secção situada entre dois autotransformadores, representado na Figura 5.8, a subestação alimenta a composição por intermédio de dois autotransformadores. A corrente de tração passa através de dois autotransformadores e retorna de seguida à subestação essencialmente através do *feeder*, resultando que a corrente de tração que circula nos carris e no solo seja mínima [4, 19].

Na Figura 5.9 está representada a distribuição do campo magnético no sistema autotransformadores.

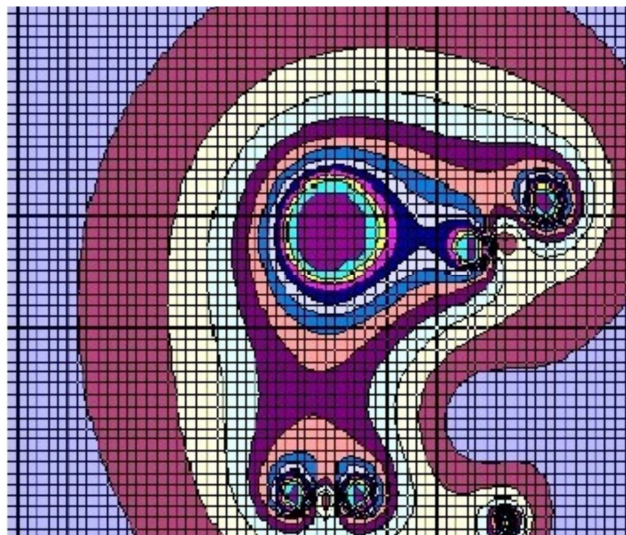


Figura 5.9 - Distribuição do campo magnético no sistema autotransformador.

5.2.4 Comparação entre os sistemas

Na Figura 5.10 está representado um gráfico comparativo dos sistemas de retorno de corrente de tração existentes [4].

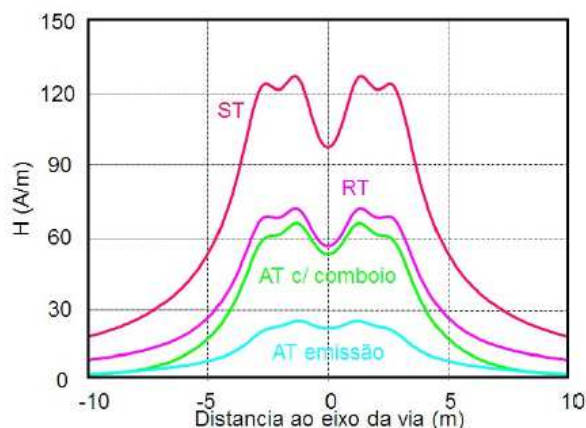


Figura 5.10 - Gráfico comparativo dos sistemas de retorno de corrente de tração.

5.3 Sistema de ligação à terra

O sistema tradicional de terras consistia na ligação dos postes de catenária à fila de carris não utilizada para os circuitos de via, instalação de piquets de terra e um cabo de terra aéreo em cobre. Recentemente este cabo foi substituído por um cabo de alumínio aço para evitar os roubos frequentes do cabo de cobre.

Foi necessário introduzir um novo sistema de terras de proteção (TP) de instalações como consequência da decisão tomada pela engenharia de sinalização de utilizar um sistema de deteção de comboios em circuitos de via de duplo carril e no sentido de se cumprir com a Normativa da C.E.

Esta situação não pode depender da fiabilidade das ligações ao carril ou dos piquets de terra para todas as estruturas metálicas, tal como previa o sistema antigo que foi instalado quando a linha foi eletrificada.

Nos tipos de solos existentes, os piquets de terra não garantem a resistividade mínima necessária. Por este motivo foi decidido adotar um sistema de terra universal baseado no sistema da Sociedade Nacional dos Caminhos de Ferro Franceses (SNCF).

Como parte integrante do sistema de terra universal da SNCF - RCT e TP, foi instalado um cabo de terra contínuo de cobre com secção de 48 mm^2 , enterrado a

uma profundidade de 60 cm no mesmo lado da linha onde se localiza o caminho de cabos da sinalização, garantindo-se uma resistência de terra inferior a 1 Ohm, mesmo através dos terrenos mais áridos.

Ao longo de cada plataforma das estações foi colocado um segundo cabo de cobre para ligação à terra de todas as estruturas e objetos metálicos. Este cabo de terra foi interligado ao cabo de terra enterrado principal.

O Normativo da REFER, RCT e TP cobre também todos os aspetos da instalação de terras de proteção, de modo claro e fácil de aplicar, simplificando assim, a coordenação futura entre projetos de diferentes disciplinas.

O cabo de terra enterrado (CdTE) e o cabo de terra aéreo (CdTA) são eletricamente contínuos, tal como os próprios carris, assim são estabelecidos 2 tipos de conexão entre estes componentes do sistema de retorno:

- Ligação transversal entre CdTE, CdTA e os carris (LTI);
- Ligação transversal entre CdTE e CdTA de ambas as vias (LEAE).

A distância entre ligações transversais ao longo da via varia consoante o tipo de ligação, situação da via, sistema de sinalização utilizado, zona relativamente à subestação, e potência da subestação de tração.

Tabela 5.1 – Distância entre as ligações transversais.

Tipo	Situação	Sinalização	Zona	Distância (m)		
				15 MVA	17,5 MVA	20 MVA
LTI-LTI	Normal	Bicarril	Verde	1400	1300	1200
LTI-LEAE	Normal	Bicarril	Vermelha	700	650	600
LTI-LTI	Normal	Monocarril	Verde	700	650	600
LTI-LEAE	Normal	Monocarril	Vermelha	350	325	300
LTI-LTI	Especial	Bicarril	Verde	900	840	750
LTI-LEAE	Especial	Bicarril	Vermelha	450	420	375
LTI-LTI	Especial	Monocarril	Verde	450	420	375
LTI-LEAE	Especial	Monocarril	Vermelha	225	210	190

A Tabela 5.1 indica alguns exemplos de distâncias entre ligações transversais, por forma a criar um sistema ferroviário onde as tensões de passo e contacto estejam dentro dos limites estabelecidos pelas normas EN50121 e EN50122-1. Com o aumento

da potência da subestação deve-se reduzir as distâncias entre as ligações transversais ao mesmo tempo aumentar a secção dos cabos que compõe o sistema de retorno de corrente. A zona é classificada em verde ou vermelha dependendo da corrente de curto-circuito. Caso esta seja superior à corrente de curto-circuito normalizada é classificada como zona vermelha.

Troço onde a corrente de curto-circuito é superior a 4,5 kA é designado na Figura 5.11 de zona vermelha.

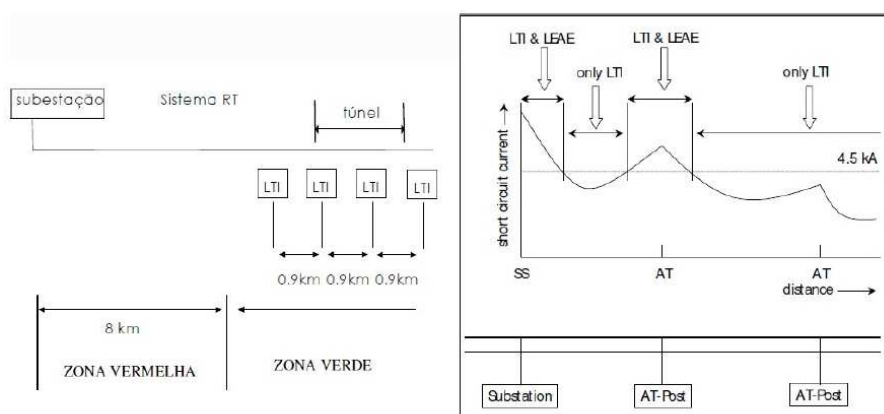


Figura 5.11 - Caracterização das zonas.

A ligação de terra dos carris pode ser efetuada de três formas, dependendo do sistema de deteção de comboios utilizado. Distinguem-se três tipos de ligação de terra do carril: ligação de terra direta, ligação de terra simétrica, ligação de terra assimétrica. O tipo de ligação irá depender do sistema de sinalização escolhido. Os postes de catenária têm de ser igualmente ligados à terra, sendo a ligação elétrica efetuada por intermédio de uma pinça instalada entre o CdTA e o poste [4, 19].

5.3.1 LTI - Ligação Transversal Integral (via única)

Entre as múltiplas possibilidades de localização das LTI's (Figura 5.12), existem algumas posições impostas para as mesmas: [4, 19]

- Na ligação da via à rede elétrica junto à Subestação - esta posição é obrigatória e não pode ser alterada;
- Na ligação da via à rede elétrica junto a um Posto AT - esta posição é obrigatória e não pode ser alterada;
- Postos de Catenária - esta posição não é obrigatória, pode ser alterada, tendo que ser compatível com a sinalização;

- Nas interfaces com a via de circulação, tais como passagens de nível, passagens superiores e passagens inferiores;
- Em intervalos regulares entre a subestação e o fim do sector de catenária (depende da potência na subestação);
- Na fronteira entre a zona de estação ou parque e plena via.

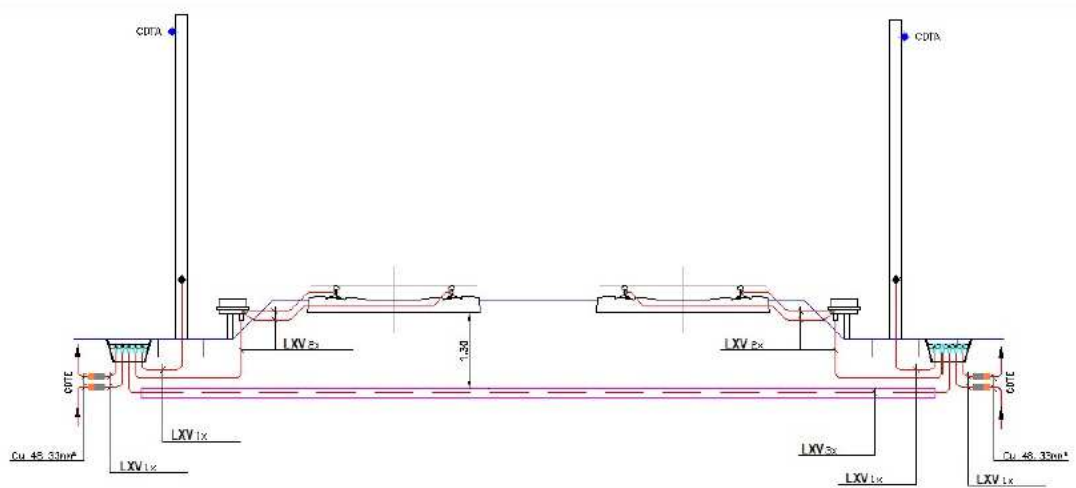


Figura 5.12 - Esquema da Ligação Transversal Integral.

5.3.2 LEAE - Ligação Equipotencial Aéreo / Enterrado (via dupla)

A colocação de LEAE's apresenta maior facilidade do que a colocação de LTI's, uma vez que, não existindo nas LEAE's ligação aos carris não é comum existirem restrições devido à sinalização [4, 19].

Assim sendo as LEAE (Figura 5.13) são necessárias:

- Entre LTI's na zona Vermelha;
- Na vizinhança de equipamentos de catenária;
- TT, TI e TP;
- Onde exista um dos seguintes equipamentos: Interruptor de comando elétrico, seccionadores (manuais ou de comando elétrico) ou disjuntores;
- Nos postos de catenária;
- Nos edifícios Técnicos;
- Nas transições entre plena via e estruturas;
- Em extremos de túneis, pontes ou viadutos;
- Nas passagens superiores e inferiores.

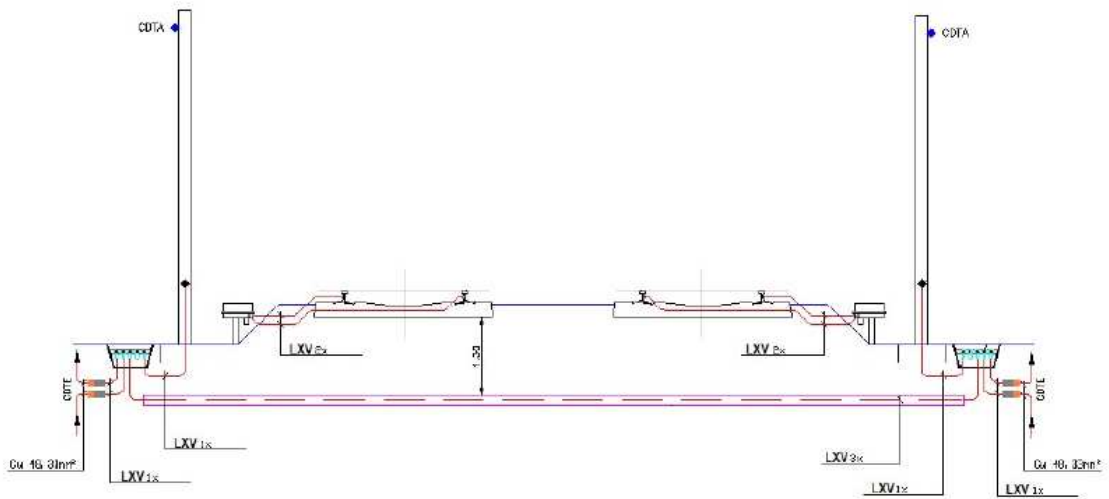


Figura 5.13 - Esquema da Ligação Equipotencial Aéreo / Enterrado.

Nas Figuras 5.14 e 5.15 estão representados exemplos de ligação à terra no sistema com condutor de retorno (RT) e no sistema autotransformadores (AT).

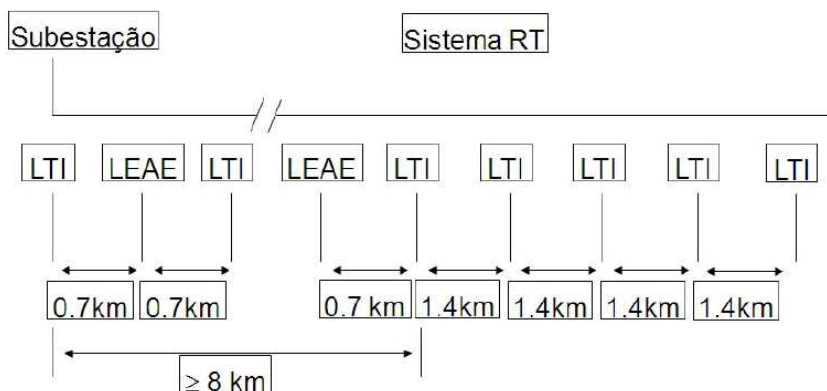


Figura 5.14 - Exemplo de ligação à terra no sistema RT.

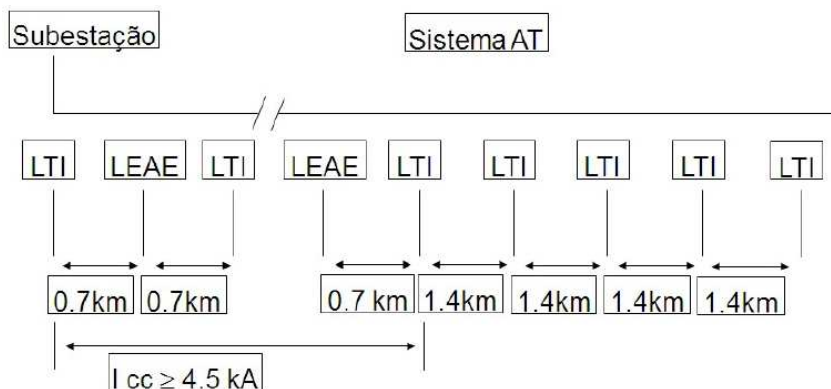


Figura 5.15 - Exemplo de ligação à terra no sistema AT.

5.4 Manutenção do sistema de retorno de corrente de tração, terras e proteção

A manutenção de um sistema de retorno de corrente de tração consiste essencialmente na verificação da continuidade elétrica do cabo de terra aéreo (CdTE), do cabo de terra aéreo (CdTA) e dos carris.

Basta uma simples inspeção visual para verificar a continuidade do CdTA. Pelo contrário o CdTE não pode ser verificado visualmente e pelo facto de ser a base da rede de terra do sistema, é necessária uma inspeção em intervalos regulares, para garantir a sua continuidade elétrica. Distinguem-se dois tipos de inspeção:

- Inspeção visual das conexões de terra nas caixas de inspeção;
- Verificação da continuidade do cabo de terra enterrado.

As conexões aparafusadas à barra de terra das caixas de inspeção devem ser visualmente inspecionadas e o binário de aperto das porcas deve ser verificado, com uma periodicidade máxima de 5 anos.

A verificação da continuidade do CdTE pode ser testada com a injeção de uma corrente contínua no CdTE isolado de todas as outras secções de CdTE. Este ensaio deverá ser realizado secção a secção para que deste modo em caso de falha ser possível a indicação da secção onde ocorre a descontinuidade do CdTE. Se porventura hajam suspeitas de descontinuidade elétrica deve-se proceder à medição da tensão de contacto [4, 19].

Na Figura 5.16 está representado o esquema geral de retorno de corrente de tração, terras e proteção.

Capítulo 6

Simulação de um trânsito de potência monofásico

Para análise ao sistema de alimentação de tração elétrica, é simulado um conjunto de cenários que permitem verificar o seu funcionamento recorrendo ao software de simulação MATLAB™/Simulink. Foi modelizado uma subestação de tração com dois sectores de catenária (sector de catenária 1 e 2) a alimentar uma ou mais locomotivas. Foram feitas simulações para os sistemas 1x25 kV e 2x25 kV.

6.1 Configuração da rede

Foi considerada a seguinte rede para a simulação (Figura 6.1):

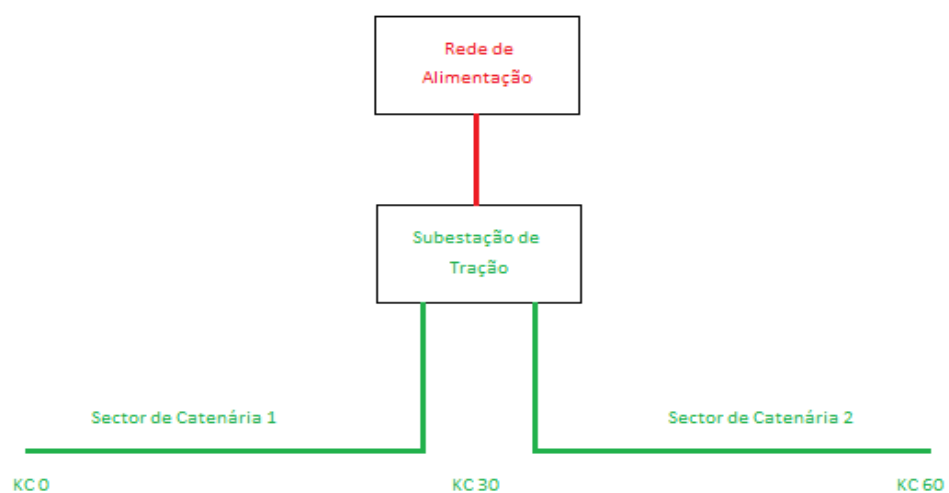


Figura 6.1 - Rede simulada

Sendo o objetivo analisar o comportamento da rede de tração elétrica considera-se que a subestação de tração é alimentada a 63 kV para o sistema de alimentação 1x25 kV e a 220 kV para o sistema de alimentação 2x25 kV.

Admitiu-se que a rede de tração possuía as seguintes características:

Subestação de Tração

As características do(s) transformador(es) de potência da subestação de tração são as seguintes, consoante o tipo de ligação 1x25 kV ou 2x25 kV :

- Subestações de Tração 1x25 kV:

$$V_{n1} = 63 \text{ kV}$$

$$V_{n2} = 26 \text{ kV}$$

$$S_n = 16,2 \text{ MVA}$$

$$Z_{cc} = 7,5 \%$$

$$R/X = 0,15$$

Subestação de tração com alimentação bifásica ou alimentação trifásica de ligação em "V", admitindo-se que a SST está instalada no quilómetro catenária (KC) 30 da linha.

- Subestações de Tração 2x25 kV:

$$V_{n1} = 220 \text{ kV}$$

$$V_{n2} = 53 \text{ kV}$$

$$S_n = 16,2 \text{ MVA}$$

$$Z_{cc} = 7,5 \%$$

$$R/X = 0,15$$

Subestação de tração com alimentação bifásica, os transformadores de potência desta SST possuem um ponto médio no enrolamento secundário ligado ao neutro e uma tensão nominal em vazio entre pólos (catenária e *feeder*) de 53 kV (2x26,5 kV). A tensão entre cada um dos pólos e o neutro é 26,5 kV. Admite-se que a SST se encontra instalada no quilómetro catenária (KC) 30 da linha.

Catenárias

Consideram-se dois sectores de catenária 1 e 2 com 30 km de extensão em via única alimentados a partir da SST. As características do sistema 1x25 kV e o sistema 2x25 kV são distintas.

As características da(s) catenária(s) são as seguintes, consoante o tipo de ligação 1x25 kV ou 2x25 kV:

- Catenária 1x25 kV:

$$Z_c = 0,131 + j0,414 \Omega/\text{km}$$

$$Z_r = 0,178 + j0,369 \Omega/\text{km}$$

- Catenária 2x25 kV:

$$Z_c = 0,131 + j0,414 \Omega/\text{km}$$

$$Z_f = 0,131 + j0,414 \Omega/\text{km}$$

$$Z_r = 0,178 + j0,369 \Omega/\text{km}$$

Autotransformadores

Os autotransformadores são utilizados apenas no sistema 2x25 kV. A distância entre autotransformadores e entre a subestação são 10 km. Nos 60 km de linha encontram-se seis autotransformadores (AT1 - KC 0, AT2 - KC 10, AT3 - KC 20, AT4 - KC 40, AT5 - KC 50, AT6 - KC 60).

As características dos autotransformadores são as seguintes:

$$S_n = 15 \text{ MVA}$$

$$Z_{cc} = 2,0 \%$$

$$R/X = 0,15$$

6.2 Configuração da Locomotiva

Foram fornecidos pela REFER os seguintes dados sobre uma locomotiva (Tabela 6.1):

Tabela 6.1 – Características da Locomotiva

Velocidade (km/h)	Esforço (kN)	Perdas Motor (kW)	Perdas Linha Conversores (kW)	Perdas Conversores (kW)	Perdas Transformador (kW)	Corrente (A)
0	316	0	65	175	32	30
76	257	110	132	242	192	262
77	255	110	132	242	192	262
80	245	110	132	242	192	262
90	222	110	132	242	192	262
100	188	110	132	242	192	262
110	175	110	132	242	192	262
120	163	110	132	242	192	262
130	129	110	132	242	192	262
140	144	110	132	242	192	262
150	129	110	132	242	192	262
159	124	110	132	242	192	262
160	120	110	131	241	188	260

6.3 Sistema 1x25 kV

Para a análise deste sistema consideram-se dois cenários de exploração da SST (configurações de SST diferentes):

- Sector 1 e 2 alimentados a partir de transformadores através das mesmas fases (ligação bifásica);
- Sector 1 e 2 alimentados a partir de transformadores através de fases distintas (ligação em “V”).

Modelizou-se o movimento da locomotiva como se fosse uma carga móvel de potência constante, que percorre a totalidade dos dois sectores de catenária a uma velocidade constante de 80 km/h.

6.3.1 Sistema 1x25 kV com ligação bifásica

Tal como referido anteriormente, neste cenário foi simulada uma locomotiva em movimento com uma velocidade constante de 80 km/h a percorrer a totalidade dos dois sectores de catenária.

Nas Figuras 6.2 e 6.3 apresenta-se o modelo de simulação construído no software de simulação MATLABTM/Simulink do sistema 1x25 kV com ligação bifásica. Nesta ligação é dispensada a zona neutra na SST por não ser necessário separar as fases de alimentação dos transformadores dado que são as mesmas (L1 e L2).

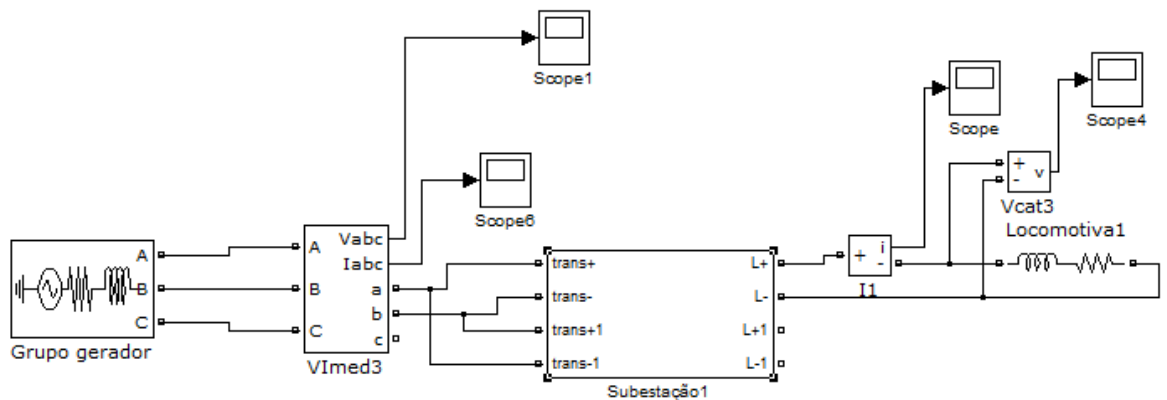


Figura 6.2 - Modelização em MATLABTM/Simulink do sistema 1x25 kV com ligação bifásica.

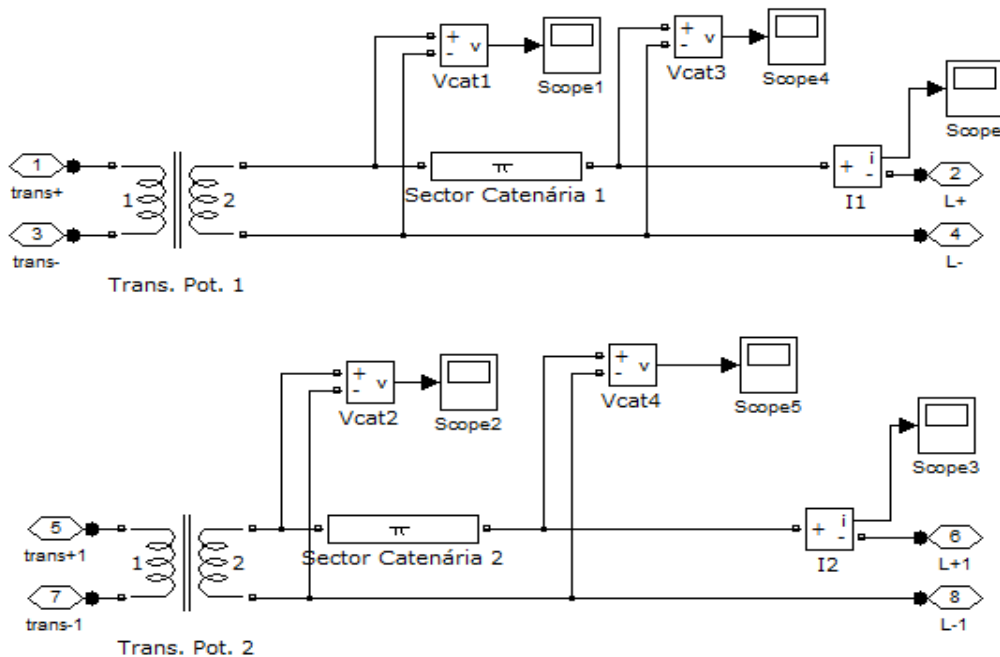


Figura 6.3 - Modelização do bloco "Subestação 1" (Subestação + Sectores de Catenária 1 e 2).

Nas Figuras 6.4 e 6.5 pode-se verificar a tensão e intensidade de corrente na catenária e no primário da SST com o sistema em vazio, ou seja, não se encontra nenhuma locomotiva em circulação nos sectores de catenária 1 e 2.

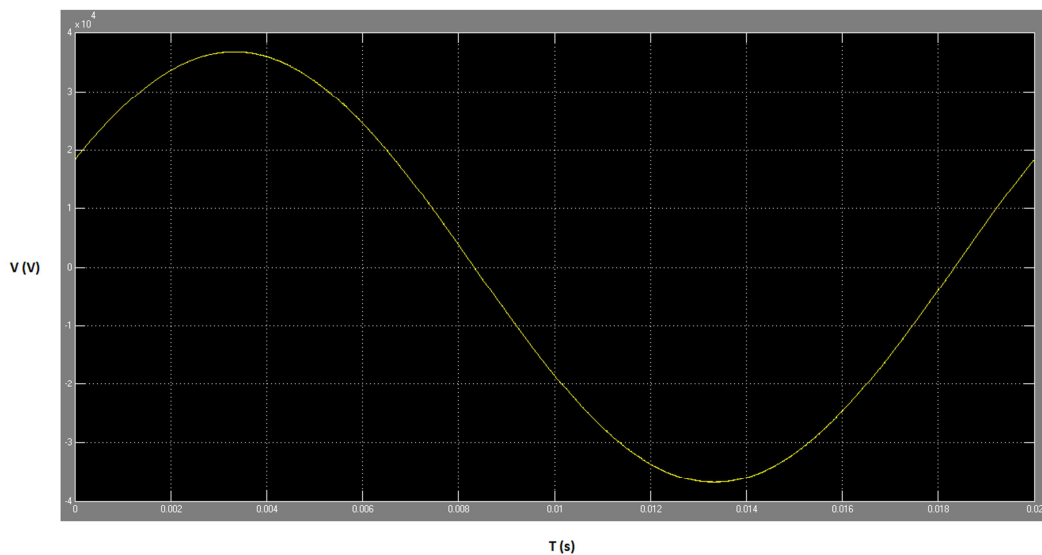


Figura 6.4 - Tensão na catenária em vazio.

Pode-se verificar que a tensão é perfeitamente sinusoidal, sem perturbações com a frequência de 50 Hz. O valor eficaz da tensão (V_{RMS}) é 25980 V

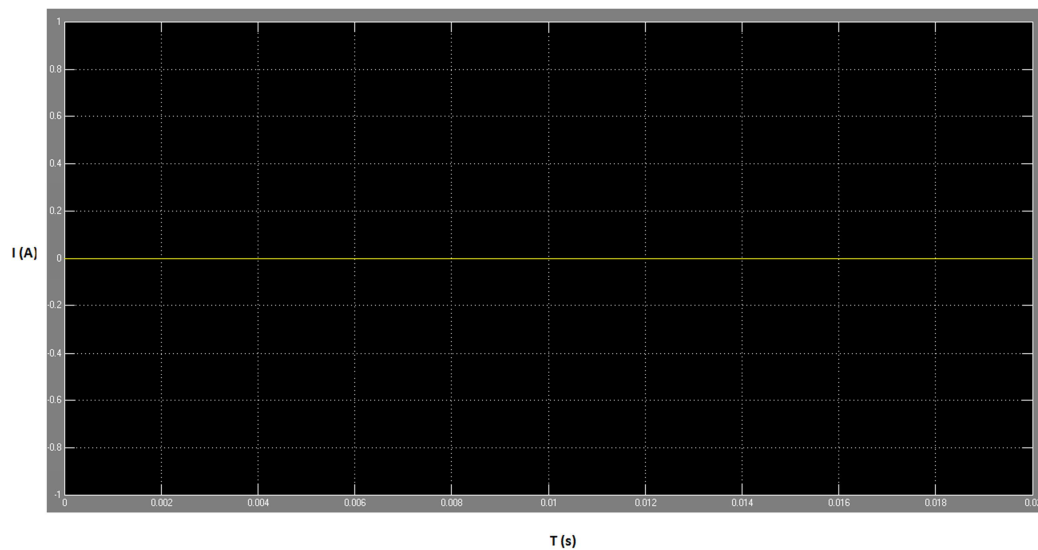


Figura 6.5 - Intensidade de corrente na catenária em vazio.

Como o sistema se encontra em vazio, não existe qualquer consumo de corrente na catenária

Nas Figuras 6.6 e 6.7 estão representadas as tensões e as intensidades de corrente no primário da SST.

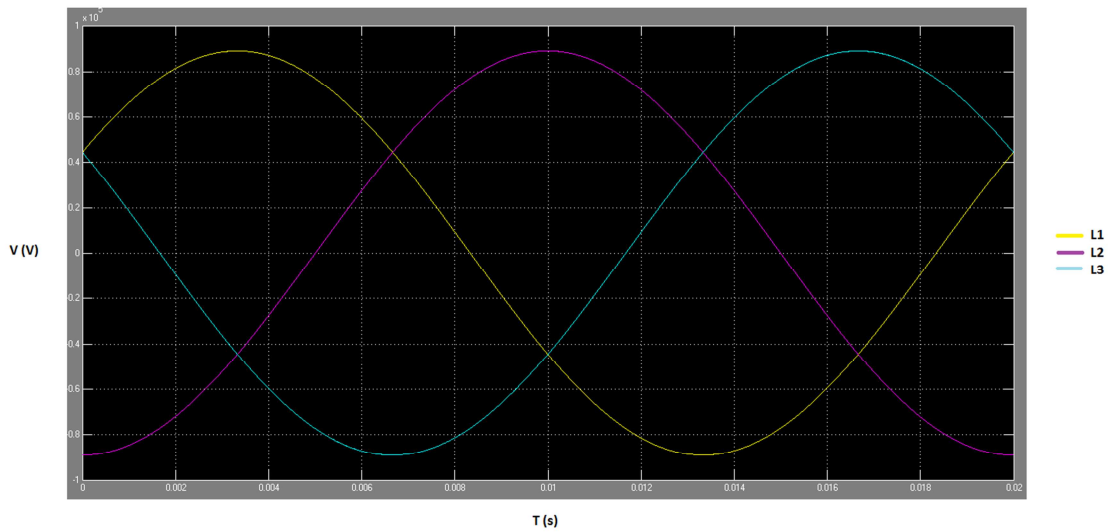


Figura 6.6 - Tensões no primário da SST em vazio.

Verifica-se que as tensões encontram-se perfeitamente equilibradas, desfasadas de 120° entre si e sem qualquer tipo de perturbação.

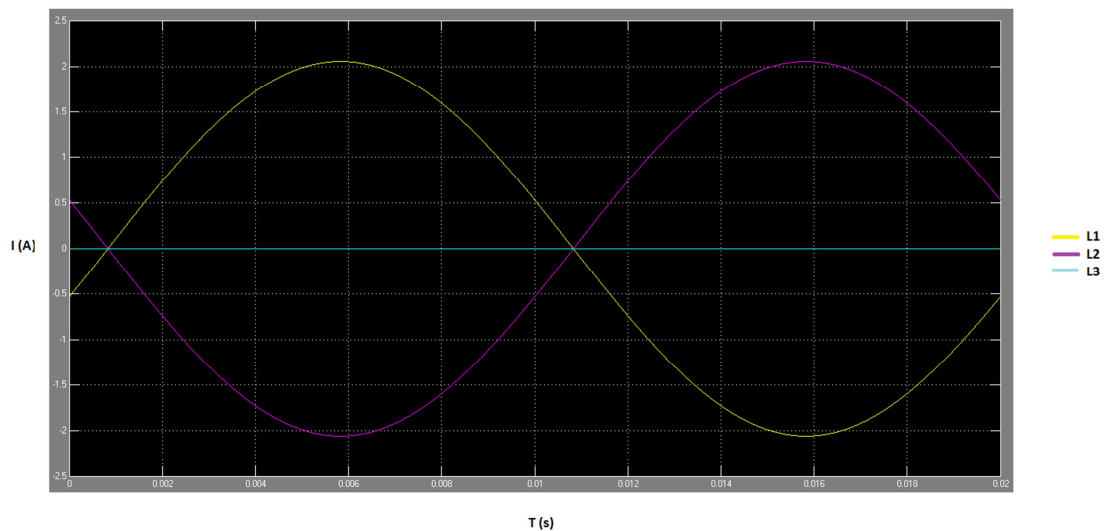


Figura 6.7 - Intensidades de corrente no primário da SST em vazio.

Na Figura 6.7 apresenta-se a evolução da intensidade de corrente no primário da SST, verifica-se que as fases L1 e L2 encontram-se com um desfasamento de 180°, ou seja, estão em oposição de fase. Isto deve-se ao facto de o transformador de potência ser bialimentado pelas mesmas fases criando um efeito de oposição entre elas. Verifica-se também que a corrente na fase L3 é praticamente nula, isto porque

os transformadores de potência da SST são alimentados pelas fases L1 e L2. Esta corrente de baixo valor deve-se à corrente em vazio dos transformadores de potência.

Neste cenário a locomotiva entra no sector de catenária 1 (KC 0) e vai percorrer a totalidade dos dois sectores de catenária (60 km).

Ao longo do percurso foram registados os valores de tensão e de corrente conforme a sua localização.

Como os dois sectores de catenária são iguais, o comportamento do sistema é simétrico para ambos os lados da subestação.

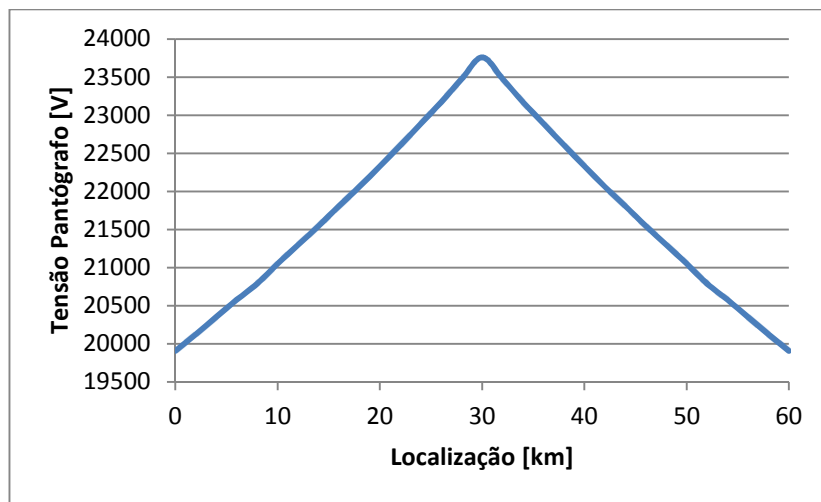


Figura 6.8 - Tensão no pantógrafo do comboio no sistema 1x25 kV.

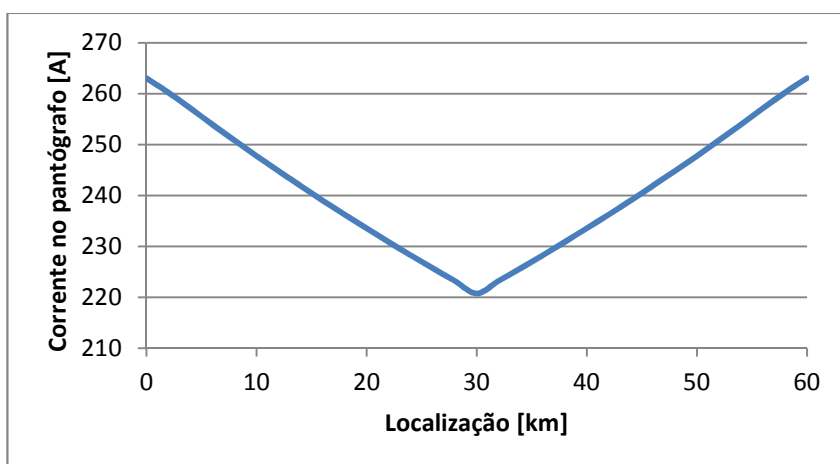


Figura 6.9 - Corrente no pantógrafo do comboio no sistema 1x25 kV.

Verifica-se que à medida que a tensão no pantógrafo diminui (Figura 6.8), para garantir a potência necessária, a intensidade de corrente aumenta o que agrava as quedas de tensão (Figura 6.9). Assim quanto mais afastado se encontra a locomotiva da subestação menor é a tensão no pantógrafo.

Através das Figuras 6.10 e 6.11 pode-se verificar as tensões e as intensidades de corrente no primário do transformador de potência da SST num determinado troço da linha, neste caso as grandezas foram estudadas no KC 0 pertencente ao sector de catenária 1.

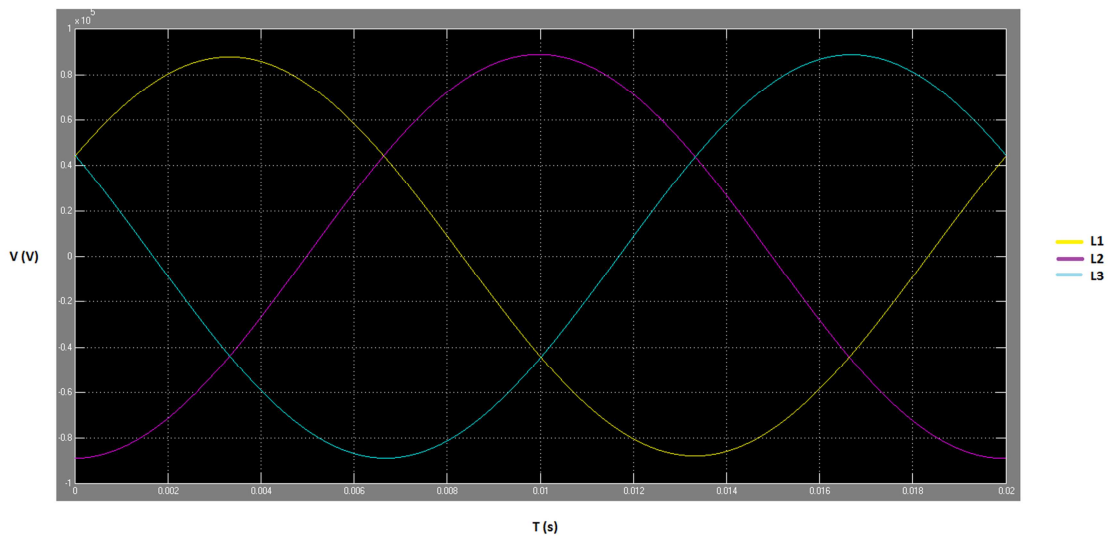


Figura 6.10 - Tensões primário da SST no KC 0 do sistema 1x25 kV.

Com uma análise mais precisa à Figura 6.10, verifica-se uma redução pouco significativa da fase L1, isto sucede porque está um comboio está a ser alimentado por esta SST.

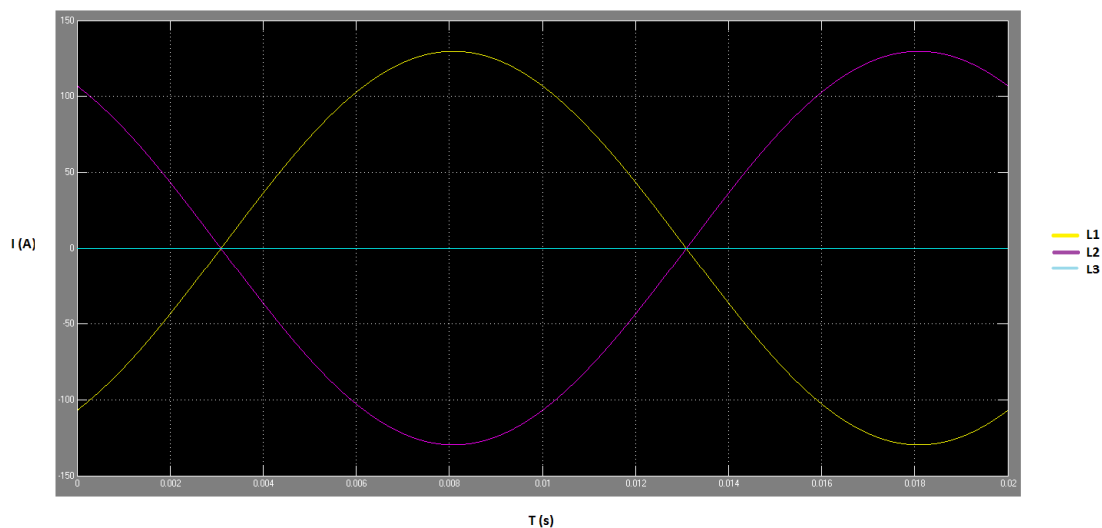


Figura 6.11 - Intensidades de corrente no primário da SST no KC 0 do sistema 1x25 kV.

Relativamente à evolução da intensidade de corrente no primário do transformador de potência da SST (Figura 6.11), verifica-se que a corrente na fase L3 é praticamente nula. Isto deve-se ao facto de o sector de catenária 1 ser alimentado pelas fases L1 e L2. O desfasamento entre as correntes L1 e L2 é de 180° . Este desfasamento é devido à rede alimentar uma carga por intermédio de um transformador bialimentado pelas fases L1 e L2 que cria um efeito de oposição nas nestas mesmas fases.

Como a carga é maioritariamente indutiva faz com que as correntes estejam desfasadas relativamente às tensões e em atraso.

6.3.2 Sistema 1x25 kV com ligação trifásica ou em “V”

Tal como no cenário anterior, foi simulada uma locomotiva em movimento com uma velocidade constante de 80 km/h a percorrer a totalidade dos dois sectores de catenária.

A particularidade deste tipo de ligação é a obrigatoriedade de existir uma zona neutra na subestação de tração para a fazer a separação das fases que alimentam os sectores de catenária 1 e 2. O sector de catenária 1 é alimentado pelas fases L1 e L2 e o sector de catenária 2 alimentado pelas fases L2 e L3.

Na Figura 6.12 apresenta-se a modelização no software de simulação MATLABTM/Simulink do sistema 1x25 kV com ligação em “V”.

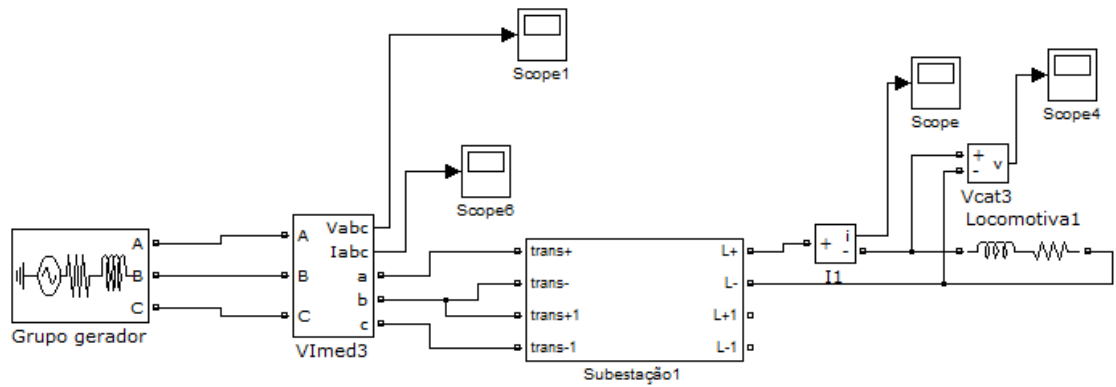


Figura 6.12 - Modelização em MATLAB™/Simulink do sistema 1x25 kV com ligação em “V”.

Nas Figuras 6.13 e 6.14 estão representadas a tensão e intensidade de corrente na catenária com a rede de tração em vazio, ou seja, não se encontra nenhuma locomotiva em circulação nos sectores de catenária 1 e 2.

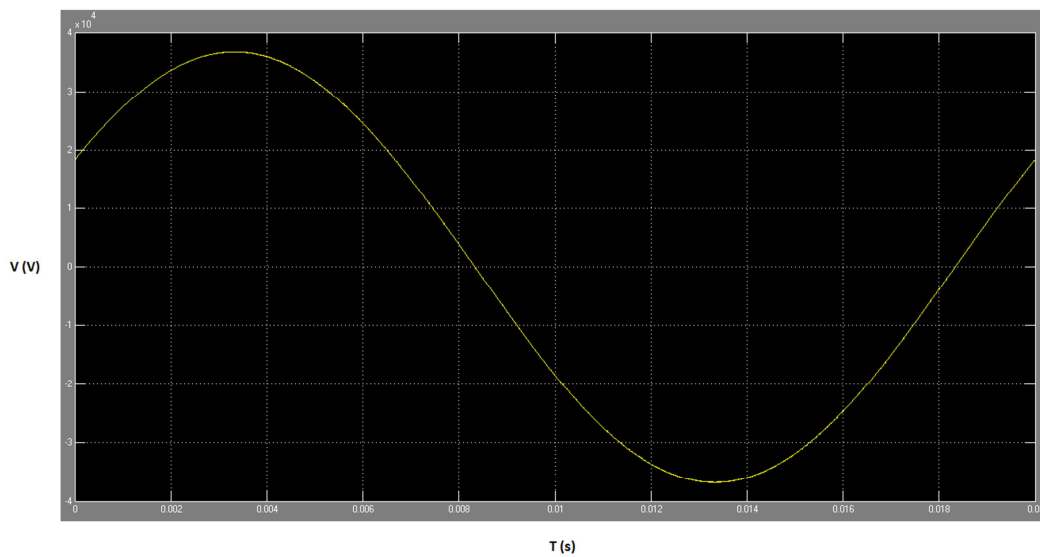


Figura 6.13 - Tensão na catenária em vazio.

Pode-se verificar pela Figura 6.13 que a tensão é perfeitamente sinusoidal, sem perturbações com a frequência de 50 Hz. O valor eficaz da tensão (V_{RMS}) é 25980 V

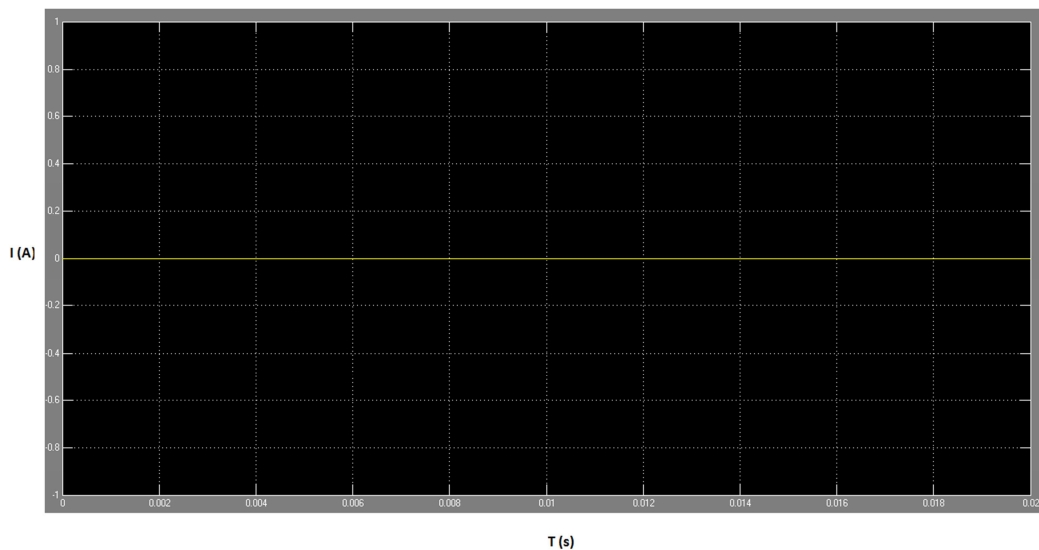


Figura 6.14 - Intensidade de corrente na catenária em vazio.

Como o sistema se encontra em vazio, não existe qualquer consumo de corrente na catenária

As Figuras 6.15 e 6.16 representam as tensões e as intensidades de corrente no primário da SST.

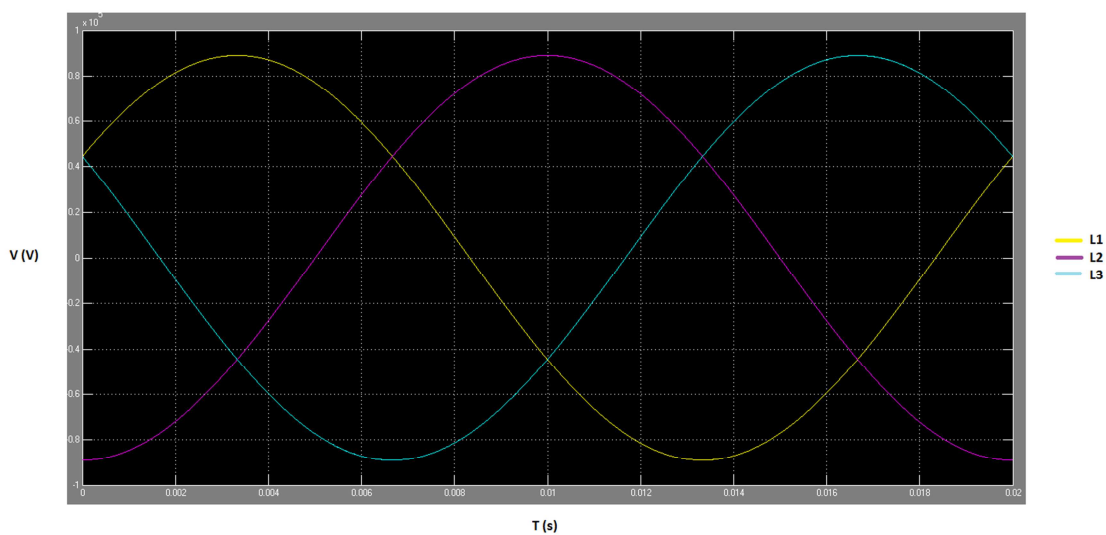


Figura 6.15 - Tensões no primário da SST em vazio.

Verifica-se que as tensões encontram-se perfeitamente equilibradas, desfasadas de 120° entre si, e sem qualquer tipo de perturbação.

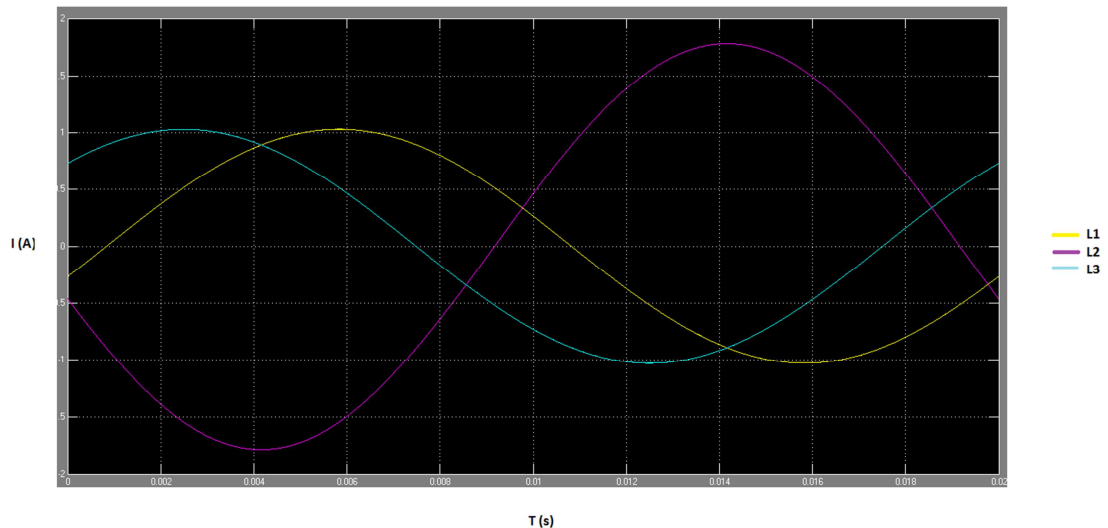


Figura 6.16 - Intensidades de corrente no primário da SST em vazio.

Verifica-se na Figura 6.16 que a corrente na fase L2 é superior às restantes, isto deve-se à fase L2 ser comum aos dois transformadores de potência da SST. Esta corrente de baixo valor deve-se à corrente em vazio dos transformadores de potência.

Neste tipo de ligação (ligação em “V”), o comportamento da rede de tração com a locomotiva em movimento é igual à ligação bifásica. A única diferença são as fases de alimentação dos sectores de catenária que são distintas para cada um dos transformadores de potência. Assim sendo verifica-se também que à medida que a tensão no pantógrafo diminui, para garantir a potência necessária, a intensidade de corrente aumenta agravando as quedas de tensão. Quanto mais afastado se encontra o comboio da subestação menor é a tensão no pantógrafo.

Dado que este tipo de ligação possui uma zona neutra na subestação de tração, em seguida será analisado o comportamento da rede de tração com a transição da locomotiva do sector de catenária 1 para o sector de catenária 2. A locomotiva ao atravessar a zona neutra, é feito um desacoplamento de carga no sector de catenária 1 e depois um acoplamento no sector de catenária 2 para não provocar um curto-circuito entre estes.

Nas Figuras 6.17 e 6.18 verifica-se o momento em que a locomotiva faz o desacoplamento do sector de catenária 1, passa pela zona neutra e seguidamente faz o acoplamento no sector de catenária 2. São verificadas as tensões e intensidades de corrente na catenária e no primário da SST.

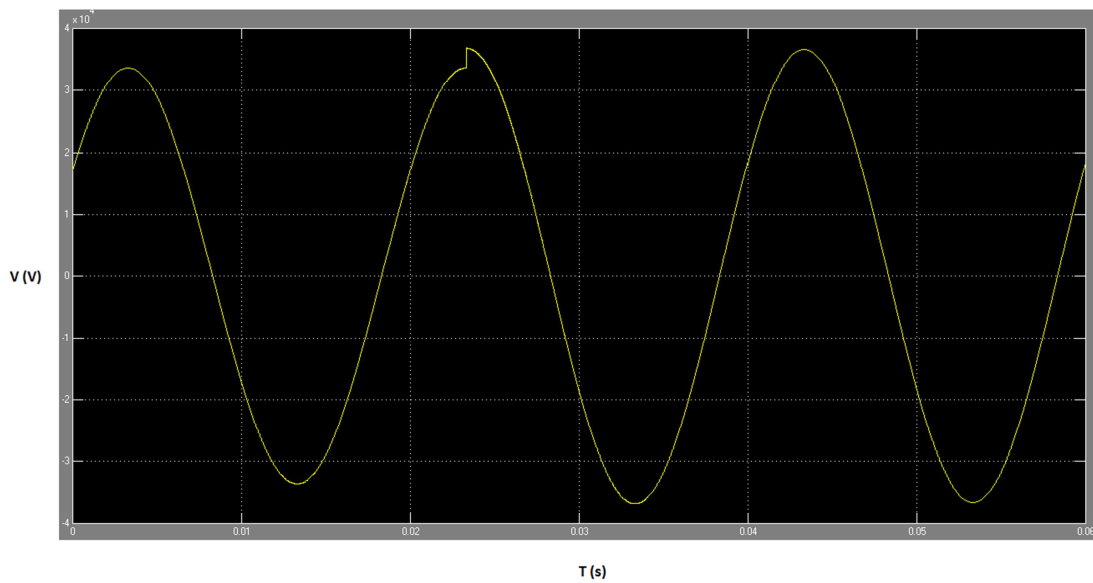


Figura 6.17 - Tensão no sector de catenária 1 no momento do desacoplamento (0.02ms).

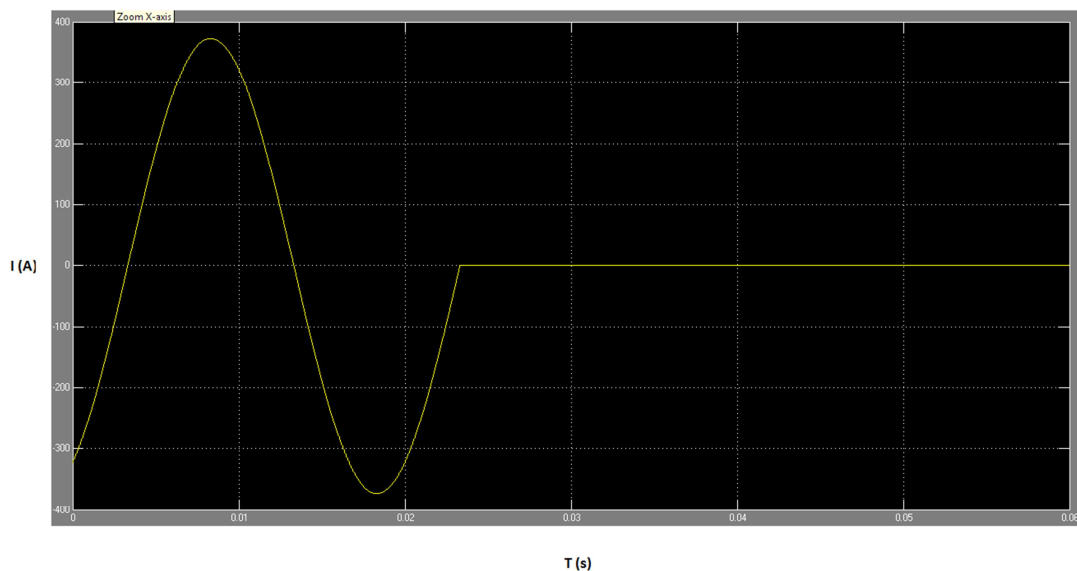


Figura 6.18 - Intensidade de corrente no sector de catenária 1 no momento do desacoplamento (0.02ms).

Analisando as Figuras 6.17 e 6.18 que representam a tensão e intensidade de corrente no sector de catenária 1, verifica-se que após o desacoplamento da carga, a tensão tende a estabilizar para o valor igual ao da simulação em vazio. Relativamente à intensidade de corrente, após o desacoplamento da carga deixa de haver consumo de corrente neste sector de catenária, como seria espectável.

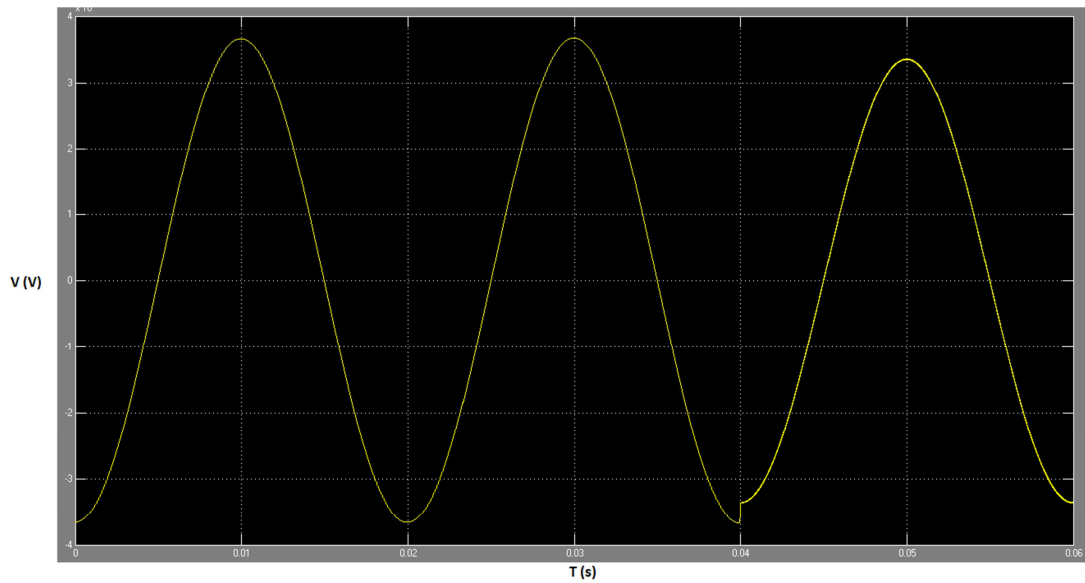


Figura 6.19 - Tensão no sector de catenária 2 no momento do acoplamento (0.04ms).

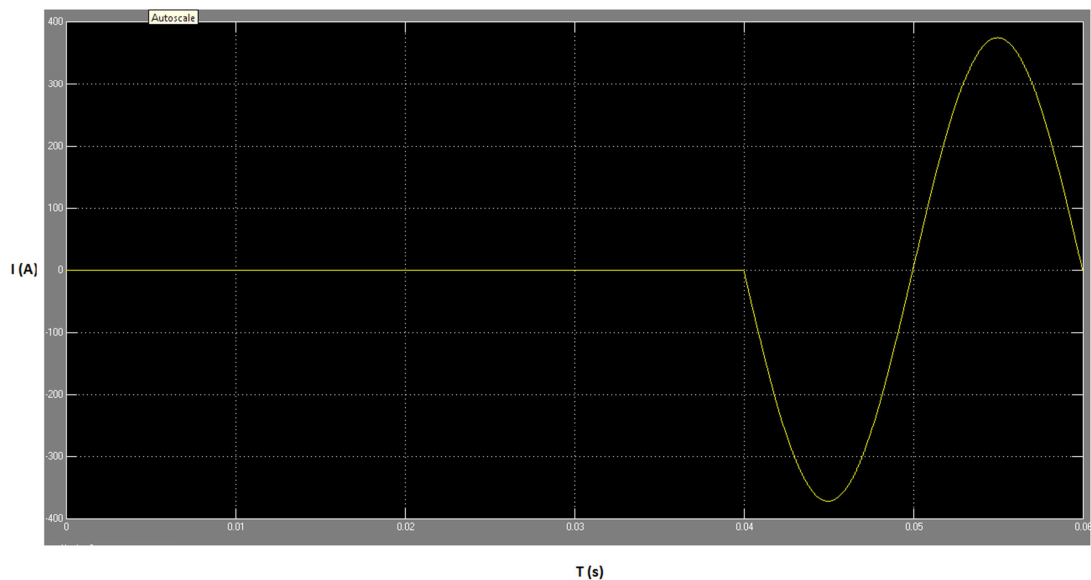


Figura 6.20 - Intensidade de corrente no sector de catenária 2 no momento do acoplamento (0.04ms).

No sector de catenária 2 é feito o acoplamento da carga depois da passagem pela zona neutra. O valor da tensão (Figura 6.19) antes do acoplamento é igual ao da simulação em vazio. Assim que é feito o acoplamento a tensão baixa, dado a queda de tensão em carga, e tende a estabilizar. A intensidade de corrente (Figura 6.20) é nula até ao momento do acoplamento da carga, depois de acoplada a carga a intensidade de corrente aumenta até o valor verificado na simulação em carga.

Através das Figuras 6.21 e 6.22 verifica-se que entre os 0.02ms e os 0.04ms, momento da passagem pela zona neutra, as tensões voltam a ficar equilibradas e

com o seu valor igual ao valor em vazio. Enquanto a locomotiva está no sector de catenária 1, verifica-se um abaixamento de tensão na fase de alimentação L1 por esta ser a fase de alimentação deste sector de catenária. Quando a locomotiva entra no sector de catenária 2 (0.04ms), verifica-se um abaixamento na fase L2 por esta ser a fase de alimentação sector de catenária em questão. O abaixamento de tensão é pouco significativo uma vez que apenas foi analisada uma locomotiva em circulação.

No que respeita às intensidades de correntes (Figura 6.23), no instante inicial antes do desacoplamento de carga pode-se verificar que as fases L1 e L2 encontram-se em oposição e a fase L3 com valor praticamente nulo como já foi explicado anteriormente. Ao atravessar a zona neutra as intensidades de corrente das fases L1 e L2 caem para valores próximos da fase L3. No instante em que é feito o acoplamento da carga no sector de catenária 2, a fase L1 permanece com valor praticamente nulo e as fases L2 e L3, fases de alimentação deste sector de catenária, aumentam até ao seu valor em carga. Verifica-se também o mesmo desfasamento entre as intensidades de corrente.

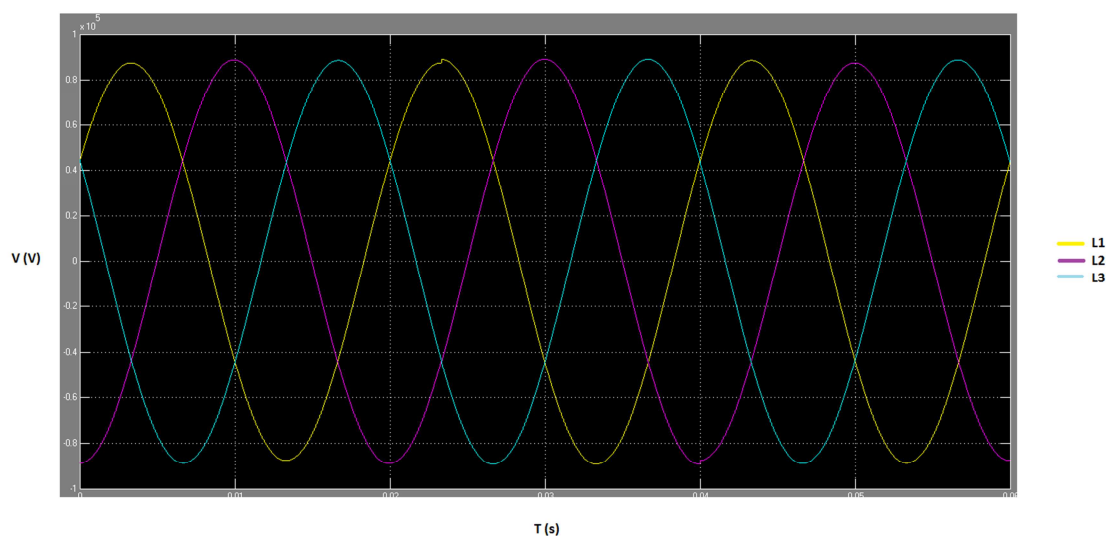


Figura 6.21 - Tensões no primário da SST momento do desacoplamento (0.02ms) /acoplamento (0.04ms).

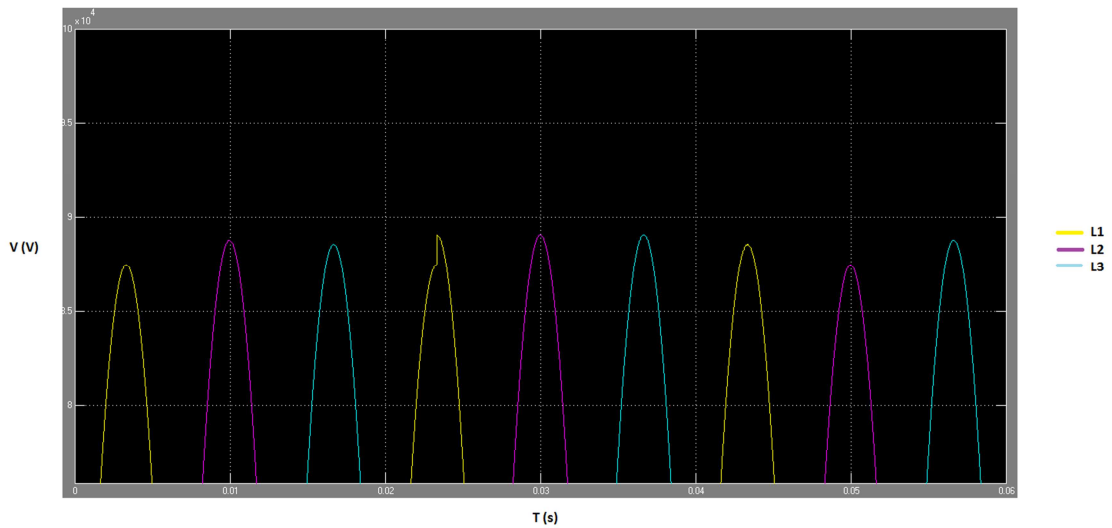


Figura 6.22 - Tensões no primário da SST momento do desacoplamento (0.02ms) /acoplamento (0.04ms).

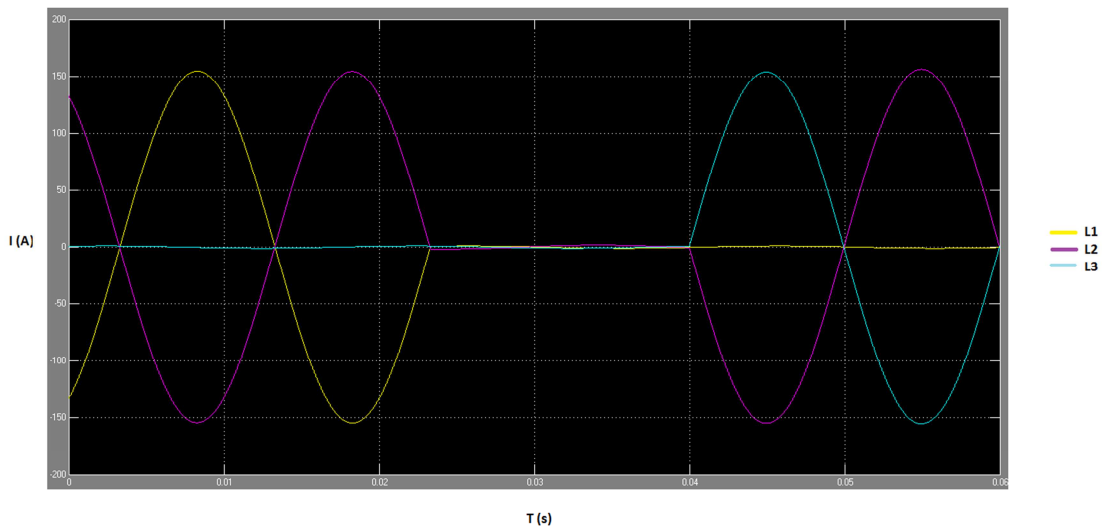


Figura 6.23 - Intensidades de corrente no primário da SST momento do desacoplamento (0.02ms) /acoplamento (0.04ms).

6.4 Sistema 2x25 kV

Para a análise deste sistema, o esquema de alimentação utilizado na subestação de tração é o bifásico através das fases L1 e L2. Modelizou-se o movimento da locomotiva como se fosse uma carga móvel de potência constante que percorre a totalidade dos dois sectores de catenária (60 km) a uma velocidade constante de 80 km/h.

6.4.1 Funcionamento normal

Nas Figuras 6.24 e 6.25 apresenta-se o modelo de simulação construído no software de simulação MATLABTM/Simulink do sistema 2x25 kV com ligação bifásica.

Nesta ligação é dispensada a Zona Neutra na SST por não ser necessário separar as fases de alimentação dos transformadores dado que são as mesmas (L1 e L2) porém pode ser utilizada para facilitar a exploração da rede.

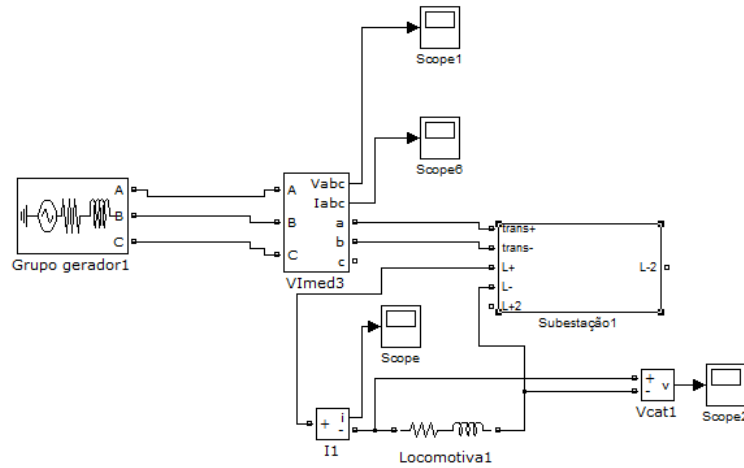


Figura 6.24 - Modelização em MATLABTM/Simulink do sistema 2x25 kV com ligação bifásica.

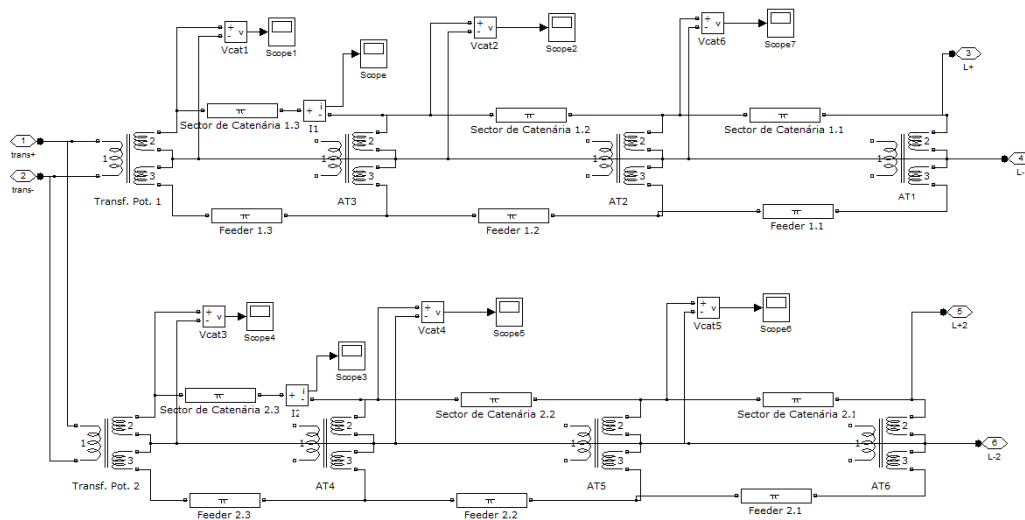


Figura 6.25 - Modelização do bloco "Subestação 1" (Subestação + Sectores de Catenária 1 e 2).

Nas Figuras 6.26 e 6.27 estão representadas a tensão e intensidade de corrente na catenária com a rede de tração em vazio, ou seja, não se encontra nenhuma locomotiva em circulação nos sectores de catenária 1 e 2.

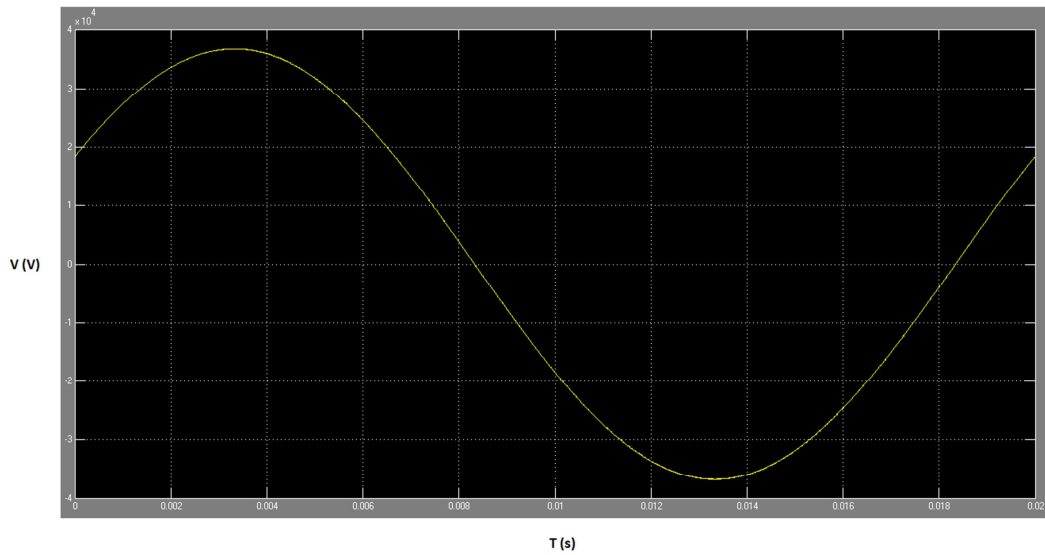


Figura 6.26 - Tensão na catenária em vazio.

Pode-se verificar que a tensão é perfeitamente sinusoidal, sem perturbações com a frequência de 50 Hz. O valor eficaz da tensão (V_{RMS}) é 26198 V

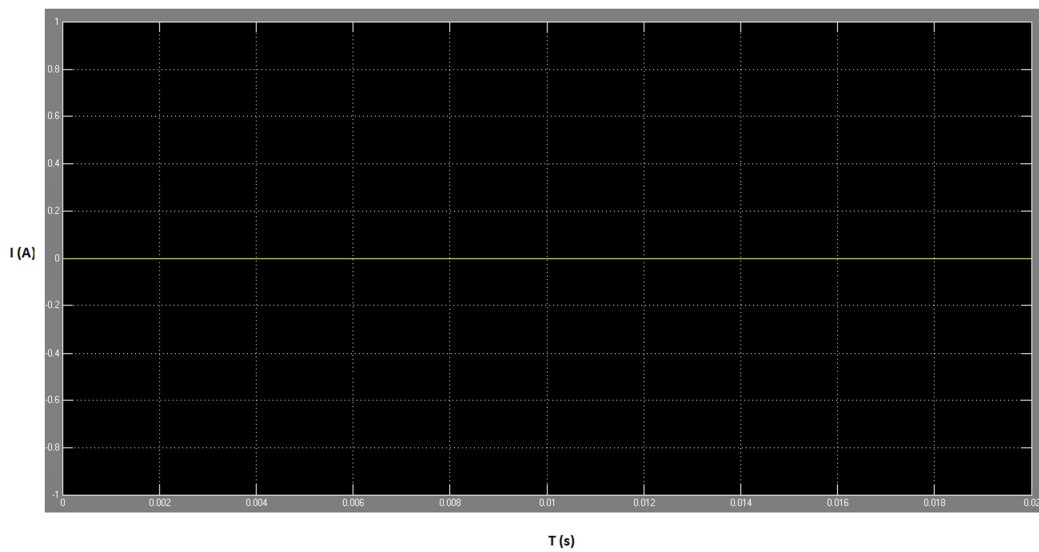


Figura 6.27 - Intensidade de corrente na catenária em vazio.

Como o sistema se encontra em vazio, não existe qualquer consumo de corrente na catenária

As Figuras 6.28 e 6.29 representam as tensões e as intensidades de corrente no primário da SST.

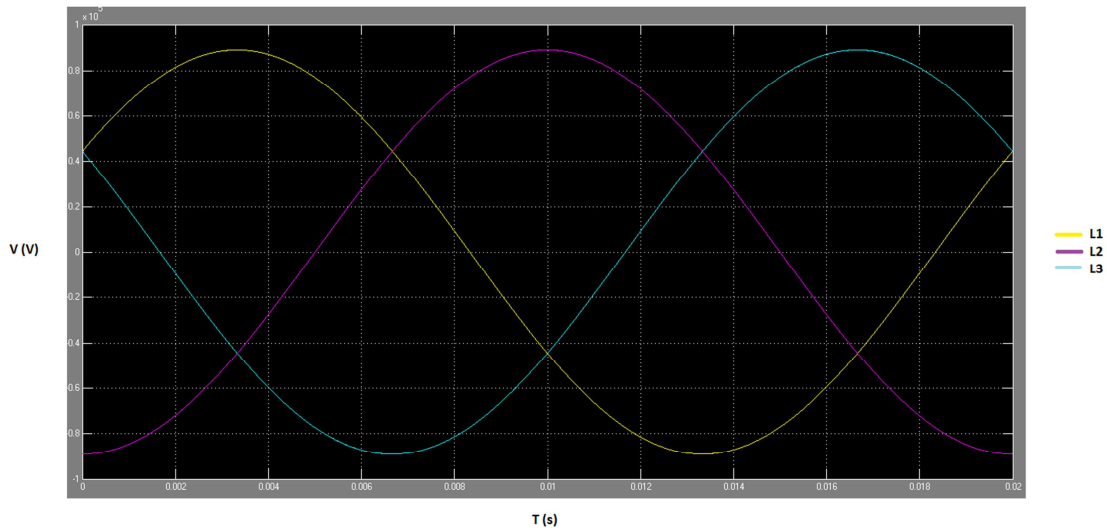


Figura 6.28 - Tensões no primário da SST em vazio.

Verifica-se que as tensões encontram-se perfeitamente equilibradas, desfasadas de 120° entre si e sem qualquer tipo de perturbação.

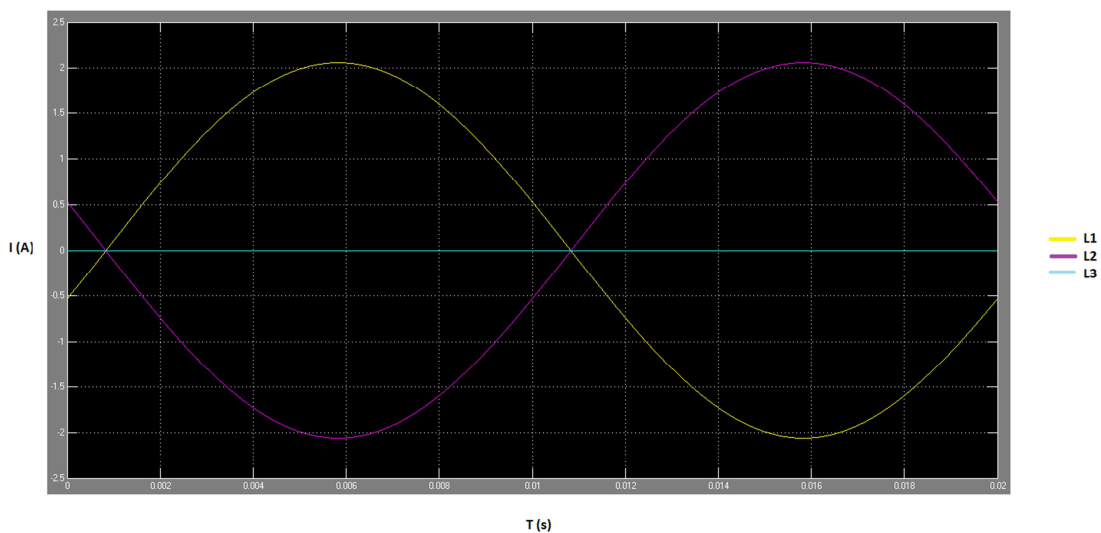


Figura 6.29 - Intensidades de corrente no primário da SST em vazio.

À semelhança do sistema 1x25 kV em vazio com ligação bifásica, verifica-se que as fases L1 e L2 encontram-se com um desfasamento de 180° , ou seja, estão em oposição. Isto deve-se ao facto de o transformador de potência ser bialimentado pelas mesmas fases criando um efeito de oposição entre elas. Verifica-se também que a corrente na fase L3 é praticamente nula, isto é devido aos transformadores de potência da SST serem alimentados pelas fases L1 e L2. Esta corrente de baixo valor deve-se à corrente em vazio dos transformadores de potência.

Tal como referido anteriormente, neste cenário foi simulada uma locomotiva em movimento com uma velocidade constante de 80 km/h a percorrer a totalidade dos dois sectores de catenária.

Este sistema de alimentação apresenta particularidades no seu funcionamento devido à existência de autotransformadores.

Ao longo do percurso foram registados os valores de tensão e de corrente conforme a sua localização. Como os dois sectores de catenária são iguais, o comportamento do sistema é simétrico para ambos os lados da subestação.

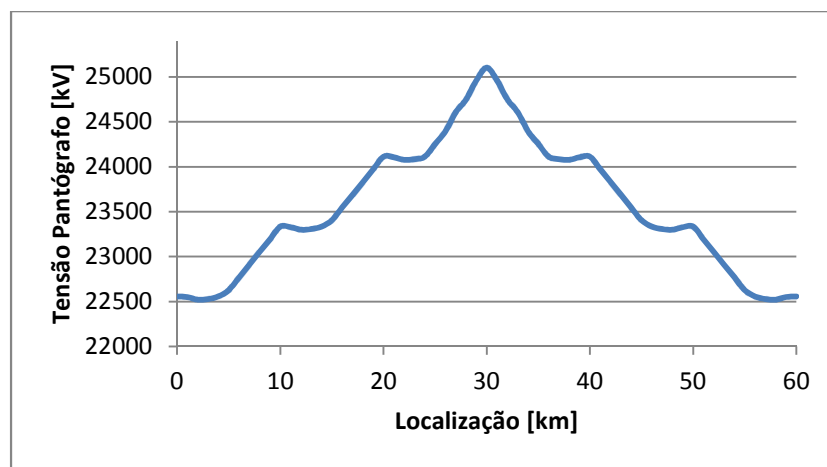


Figura 6.30 - Tensão no pantógrafo do comboio no sistema 2x25 kV.

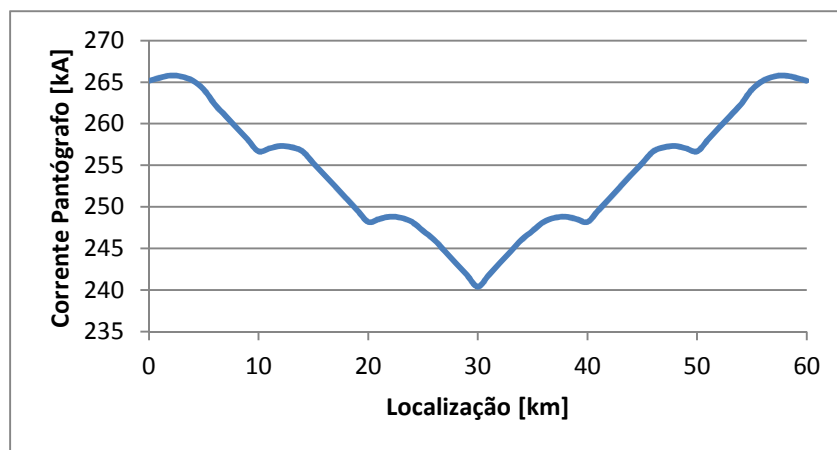


Figura 6.31 - Corrente no pantógrafo do comboio no sistema 2x25 kV.

A tensão registada no pantógrafo da locomotiva (diferença de potencial entre a catenária e o carril), para a carga de potência constante, apresenta uma inversão na tendência decrescente nas zonas próximas de um autotransformador (KC 0, KC 10, KC 20, KC 40, KC 50 e KC 60) como se pode verificar na Figura 6.30. À medida que as

quedas de tensão se acentuam, para garantir potência constante à carga, as intensidades de corrente aumentam (Figura 6.31).

O fluxo de energia nos autotransformadores é resultado da diferença da tensão na catenária e no *feeder* (ambas referenciadas ao sistema de retorno/carril). Quanto maior essa diferença maior o fluxo de energia. Quando as duas tensões se encontram equilibradas, não há fluxo de energia através do transformador.

Nas Figuras 6.32 e 6.33 pode-se verificar as tensões e as intensidades de corrente no primário do transformador de potência da SST num determinado trecho da linha, neste caso as grandezas foram estudadas no KC 0 pertencente ao sector de catenária 1.

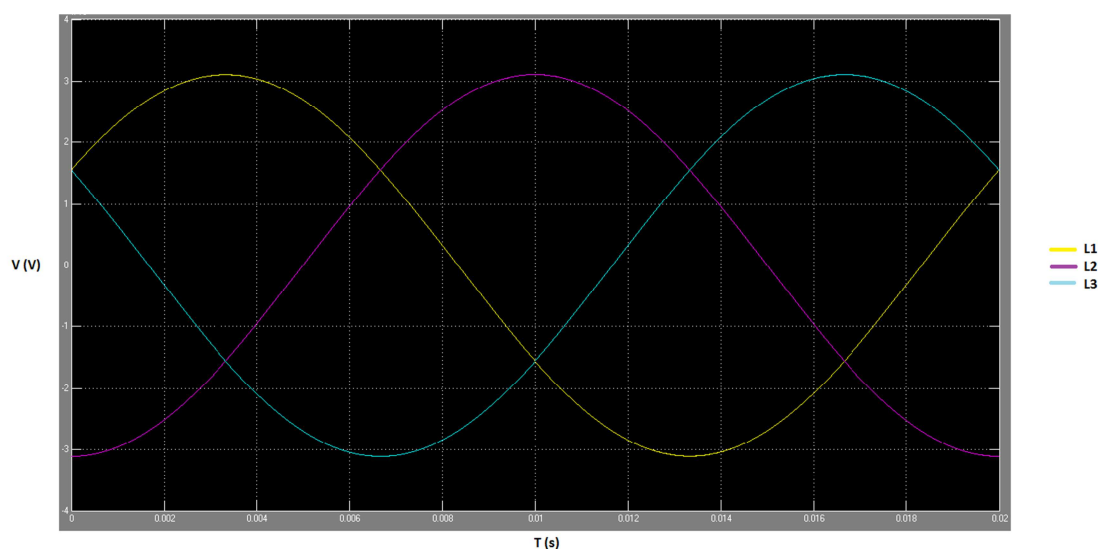


Figura 6.32 - Tensões primário da SST no KC 0 do sistema 2x25 kV.

Efetuada uma análise mais precisa à Figura 6.32 verifica-se uma redução pouco significativa das fases L1 e L2, isto sucede porque está um comboio está a ser alimentado por esta SST.

Na Figura 6.33 que apresenta a evolução da intensidade de corrente no primário do transformador de potência da SST, verifica-se que o desfasamento entre as correntes L1 e L2 é de 180°, ou seja, de mais 60°. Este desfasamento é devido à rede alimentar uma carga por intermédio de um transformador bialimentado pelas fases L1 e L2 que cria um efeito de oposição nas nestas mesmas fases. A corrente na fase L3 é praticamente nula. Isto deve-se ao facto de o sector de catenária 1 ser alimentado pelas fases L1 e L2.

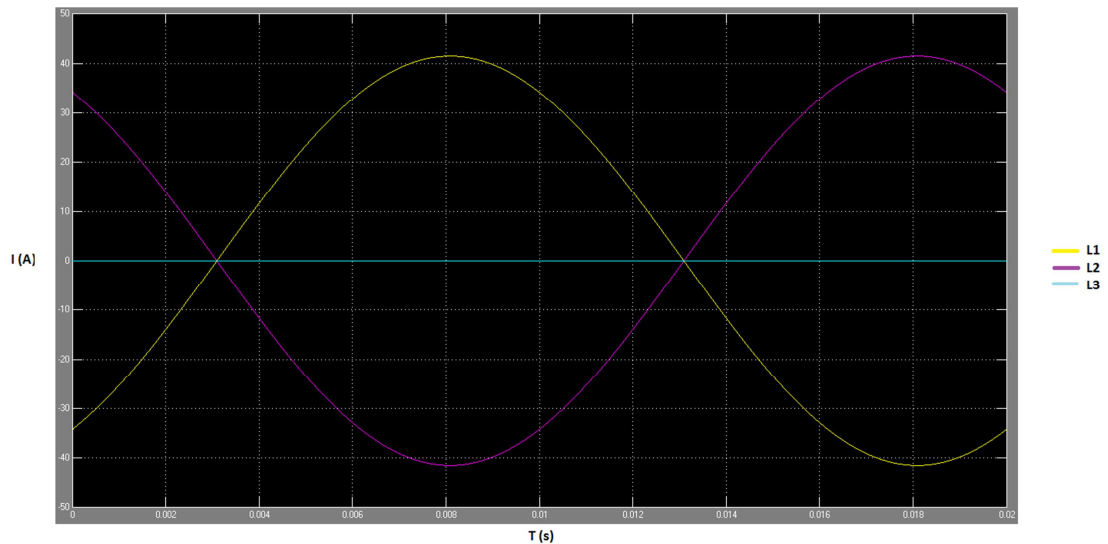


Figura 6.33 - Intensidades de corrente primário da SST no KC 0 do sistema 2x25 kV.

Como a carga é maioritariamente indutiva faz com que as correntes estejam desfasadas relativamente às tensões e em atraso.

6.4.2 Modos degradados

Neste cenário foram testados os modos degradados, ou seja, a saída de serviço de dois autotransformadores, um autotransformador intermédio e um autotransformador final por forma a verificar o comportamento do sistema de alimentação e os impactos.

A comparação dos modos de funcionamento serão os seguintes:

- Funcionamento normal;
- AT5 fora de serviço;
- AT6 fora de serviço.

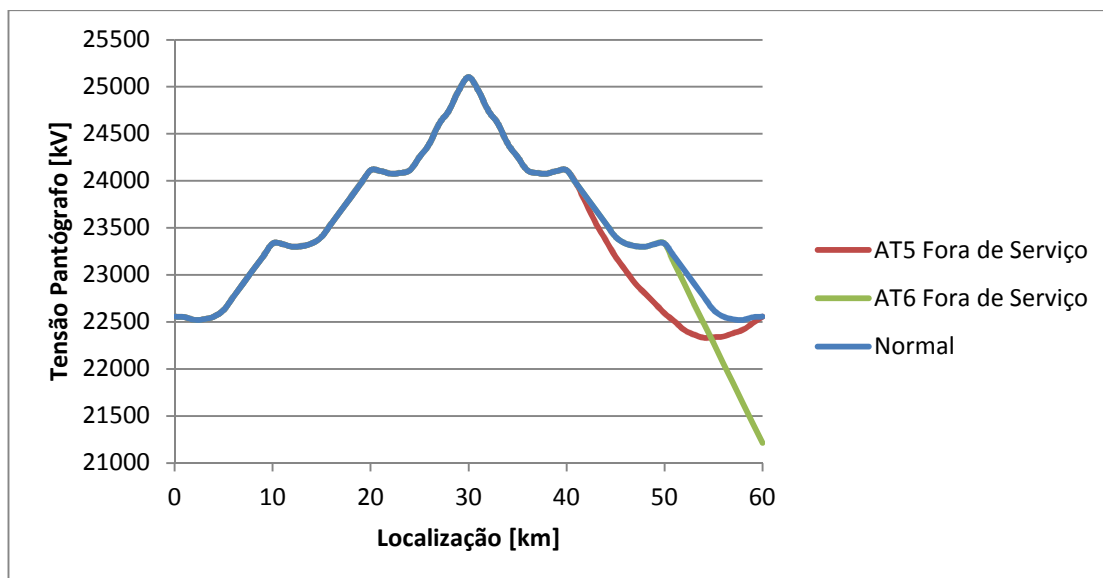


Figura 6.34 - Tensão no pantógrafo da locomotiva no sistema 2x25 kV.

O comportamento do sistema de alimentação nos modos degradados (Figura 6.34) apenas difere do funcionamento normal na proximidade do equipamento em falha. É possível verificar que a falha do autotransformador no extremo no sector de catenária 2 (AT6) afeta mais a performance do sistema de alimentação.

A potência que transita nos autotransformadores tem maior incidência quando existe uma carga na sua proximidade, atingindo um máximo quando o comboio se encontra junto do autotransformador. À medida que o comboio se afasta de um autotransformador a potência que nele transita diminui.

6.5 Conclusões

Neste capítulo foi analisada a performance dos sistemas de tração com alimentação em 25 kV, 50 Hz. Foi simulado um troço de rede com 60 km, 30 km para cada lado da subestação de tração pertencente a cada sector de catenária (1 e 2) recorrendo a um software de simulação, o MATLABTM/Simulink.

Nos cenários estudados para o sistema 1x25 kV verificou-se que à medida que o comboio se afasta da subestação, a tensão no pantógrafo diminui e para garantir a potência necessária, a intensidade de corrente aumenta o que por sua vez agrava as quedas de tensão na catenária. Relativamente ao primário do transformador da SST verificou-se que as tensões nas fases L1 e L2 sofreram um pequeno abaixamento com apenas uma locomotiva, dado que existem varias locomotivas a circular nesta rede e

também por ser a de maior extensão nacional, pode-se concluir que este sistema provocará implicações na rede a montante.

Quanto à intensidade de corrente no primário do transformador de potência da SST, verificou-se que a corrente na fase L3 é nula quando o sector de catenária da subestação é alimentado pelas fases L1 e L2 e a existência de um desfasamento entre as fases L1 e L2 superior a 60° . As correntes encontram-se em atraso face às tensões dada a natureza indutiva da carga (locomotiva). Quando o sector de catenária é alimentado pelas fases L2 e L3, a corrente na fase L1 é nula e o desfasamento superior a 60° passa a ser entre as fases L2 e L3.

As zonas neutras são obrigatórias na ligação trifásica ou em “V” pois fazem a separação das fases entre os sectores de catenária. Podem também ser adotadas pela ligação bifásica mas no sentido de facilitar a exploração da rede. A passagem da locomotiva pela zona neutra é feita sem alimentação e praticamente sem perder velocidade devido à inércia da carga.

No cenário estudado para o sistema 2x25 kV verificou-se que existem particularidades no seu funcionamento devido à existência de autotransformadores ao longo dos sectores de catenária. Para a carga com potência constante, a tensão no pantógrafo apresenta uma inversão na tendência decrescente na proximidade dos autotransformadores e à medida que as quedas de tensão se acentuam, as intensidades de corrente aumentam para garantir a potência constante à carga. No primário do transformador de potência da SST verificou-se que a tensão nas fases L1 e L2 sofreram um pequeno abaixamento com apenas uma locomotiva. Por se tratar de uma rede menor e com um menor número de locomotivas a circular os desequilíbrios de tensão serão mais elevados e notórios que no sistema 1x25 kV.

Verificou-se que a corrente na fase L3 é nula devido à subestação ser alimentada pelas fases L1 e L2. Verificou-se também a existência de um desfasamento entre as fases L1 e L2 de mais de 60° . As correntes encontram-se em atraso face às tensões dada a natureza indutiva da carga (locomotiva).

A tensão no pantógrafo do comboio (diferença de tensão entre catenária e carril) está relacionada com a potência consumida ou injetada na rede e com a impedância a montante, que por sua vez é dependente da distância do comboio à origem.

Para a mesma potência, o sistema 2x25 kV apresenta quedas de tensão muito inferiores às verificadas no sistema 1x25 kV, no entanto, na proximidade da subestação esta situação inverte-se. Como os transformadores utilizados nos dois sistemas têm a mesma impedância de curto-circuito e devido ao aumento da corrente no enrolamento do transformador 2x25 kV ligado à catenária, quando a carga se encontra próximo da subestação, a queda de tensão no transformador neste caso é superior à verificada no sistema 1x25 kV.

Capítulo 7

Conclusão

A realização deste trabalho teve como objetivo analisar e estudar tecnicamente o sistema de alimentação de tração elétrica para os sistemas 1x25 kV - rede convencional e 2x25 kV - rede convencional + alta velocidade.

O sistema 1x25 kV, designado também como sistema convencional é o sistema de alimentação mais utilizado em território nacional com uma extensão de 1210 km de comprimento o que representa 89% da rede eletrificada. As subestações de tração do sistema 1x25 kV podem ter dois tipos de ligação, a ligação em “V” que possui três transformadores em que um é de reserva e os restantes alimentam sectores de catenária distintos. Estes sectores de catenária são separados por zonas neutras junto da subestação de tração devido às tensões de alimentação serem diferentes. Caso esta zona neutra não existisse seria provocado um curto-circuito. As zonas neutras são troços de catenária sem tensão com o propósito de separar eletricamente sectores de catenária ou duas subestações diferentes.

A ligação bifásica possui 2 transformadores, sendo um deles de reserva, não necessita de zona neutra entre sectores de catenária pois as fases de alimentação são as mesmas, não havendo o risco de curto-circuito. As zonas neutras podem ser adotadas neste tipo de ligação mas para efeitos de facilidade na exploração da rede de tração.

As principais vantagens deste sistema convencional quando comparado com o sistema 2x25 kV são menores custos de instalação (média 25% inferior), menores custos de manutenção e menores desequilíbrios provocados na REN/EDP.

O sistema 2x25 kV é o sistema de alimentação de catenária mais recente em Portugal, a sua extensão é de aproximadamente 202 km de comprimento (linha da Beira Alta) o que representa 9% da rede eletrificada. Os restantes 2%, como já foi mencionado, pertencem ao sistema obsoleto mas ainda existente, o sistema alimentado a 1500 V cc.

As subestações de tração do sistema 2x25 kV são alimentadas pela ligação bifásica com a particularidade de existirem autotransformadores ao longo da catenária. A finalidade dos autotransformadores é fazer com que a corrente de retorno circule pelo *feeder* (-25 kV) e não pelo carril. Este sistema possibilita uma maior distância entre subestações quando comparado com o sistema convencional.

As principais vantagens do sistema 2x25 kV face ao sistema 1x25 kV são permitir o transporte de maior quantidade de energia, possibilita uma maior distancia entre as subestações de tração dado que possui autotransformadores ao longo da catenária assim como uma linha de alimentação negativa denominada *feeder*, menor impedância equivalente, menor corrente a circular pelos carris dado que grande parte da corrente de retorno circula pelo *feeder* o que leva também a menos perdas.

7.1 Trabalhos Futuros

Após a realização deste trabalho, verifica-se que existem vários aspetos que ainda podem ser melhorados, pode ser feito um vasto leque de análises sobre este tema que poderão ser alvo de estudo futuro. Sugerem-se os seguintes tópicos:

- Parametrização de toda a rede a montante da subestação, produção, subestações elevadoras, rede de transporte, subestações abaixadoras e rede de distribuição para uma análise mais aproximada das grandezas elétricas.
- Simulação de defeitos na rede de tração para ambos os sistemas, 1x25 kV e 2x25 kV.
- Análise de uma rede de tração com um maior número de subestações, com um maior número de locomotivas em circulação, com sectores de catenária alimentados a partir de um único transformador (ligação bifásica) ou alimentados a partir de transformadores distintos (ligação em “V”).
- Análise em diferentes pontos da rede de transporte para comparar os impactos que cada sistema provoca na rede a montante das subestações de tração.

Capítulo 8

Referências e Anexos

8.1 Referências Bibliográficas

- [1] “Cronologia do Caminho-de-ferro em Portugal”. Disponível em <<http://www.trainlogistic.com>>.
- [2] “Electric traction”. Disponível em <<http://www.engrailhistory.infol>>.
- [3] Guedes, M., “Introdução à Tracção Eléctrica”, 2000.
- [4] REFER, “Energia de Tracção”, 2000a.
- [5] Anjos, C., “A catenária e as outras Instalações Fixas de Tracção Eléctrica ”, 2007.
- [6] Mota, A., “Projectos Porto e Norte”, 2001.
- [7] Frederico, M., “Subestações de Tração”, 1997.
- [8] Cunha, L., Ferreira, E., “Instalações Fixas de Tração Eléctrica”, 1997.
- [9] REFER, “Energia de Tracção - Subestações”, 2000.
- [10] Salvador, F., “Sistemas de Energia de Tração Eléctrica”, 2003.
- [11] REFER, “Energia de Tracção”, 2000b.
- [12] Ventura, J., Pereira, T., “Competências Locais em Subestações de Tracção”, 2004.
- [13] Rondán, G., “Infraestruturas Ferroviárias de Alta Velocidade ”, 2006.
- [14] REFER, “Conceitos de Catenária e Energia de Tracção”, 2006.
- [15] Guedes, M., “Tracção Eléctrica”, 2005.

- [16] Costa, S., “A Catenária”, 1997.
- [17] Torres, Z., “Cálculo Mecánico de la Catenaria de la Línea de Alta Velocidad Madrid”, Galicia. Madrid, 2010. Projeto final de curso apresentado à Universidad Carlos III de Madrid - Escuela Politécnica Superior - Departamento de Ingeniería Mecánica.
- [18] Sheard, E., “Evolução dos sistemas de Catenária na linha do Norte”, 2003.
- [19] Raimundo, D., “Os Sistemas de Terras de Proteção e de Serviço no Projeto Português para Comboios Alta Velocidade”, Porto, 2009. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.
- [20] Anjos, C., “Projetos de Catenária”, 2007.
- [21] Vieira, N., “Manutenção / Conservação de Catenária. Porto 2006”. Relatório de Estágio apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [22] Norma EN50121, Railway applications - Electromagnetic compatibility.
- [23] Norma EN50163, Railway applications - Supply voltages of traction systems.
- [24] Norma EN50122-1, Railway applications - Fixed installations - Part 1: Protective provisions relating to electrical safety and earthing.

8.2 Anexos

8.2.1 Anexo 1

REFER **REDE FERROVIÁRIA PORTUGUESA**
 PORTUGUESE RAIL NETWORK
 agosto 2012

- Rede Principal
- Rede Complementar
- Rede Secundária

- 1 Minho, Linha do
- 3 São Gemil, Concordeância de
- 4 Braga, Ramal de
- 5 Leixões, Linha de
- 6 Douro, Linha do
- 8 Norte, Linha do
- 9 Guimarães, Linha de
- 14 Tua, Linha do
- 16 Vouga, Linha do
- 20 Beira Alta, Linha do
- 21 Lousã, Ramal da
- 22 Alfaiates, Ramal de
- 23 Oeste, Linha do
- 24 Tomar, Ramal de
- 25 Beira Baixa, Linha de
- 27 Leste, Linha do
- 28 Sinto, Linha de
- 29 Cintura, Linha de
- 32 Cascais, Linha de
- 33 Vendas Novas, Linha de
- 34 Alentejo, Linha do
- 37 Sul, Linha do
- 38 Sines, Linha de
- 39 Évora, Linha de
- 45 Algarve, Linha do
- 46 Póvoa, Concordeância de
- 48 Funchais, Concordeância de
- 49 Fátima, Concordeância de
- 52 Vemido, Concordeância de
- 53 Aguçadã, Concordeância de
- 54 Aguas de Moura, Concordeância de
- 55 Bombel, Concordeância de
- 56 Xabregas, Concordeância de
- 57 Sete Rios, Concordeância de
- 58 Louçã, Ramal do
- 62 Figueira da Foz, Ramal da
- 63 Matinha, Linha de
- 69 Norte Setú, Concordeância de
- 79 Neves Corvo, Ramal
- 82 Siderurgia Nacional, Ramal da
- 90 Porto de Aveiro, Ramal do



