

**Estudo e Análise do Impacto do Sistema de Alimentação  
de Tração Elétrica (1x25kV - Rede convencional,  
2x25kV - Rede convencional + Alta velocidade) na Rede  
de Transmissão**



**Nelson Daniel Cunha da Silva**

**Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica -  
Sistemas Elétricos de Energia sob orientação do Professor Doutor Filipe  
Miguel Tavares de Azevedo**

**Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200 - 072 Porto, Portugal**

Outubro de 2012



## Agradecimentos

Este projeto não teria sido possível sem a ajuda e participação de algumas pessoas, a quem gostaria de deixar aqui a minha gratidão. Primeiro, ao meu orientador, Professor Doutor Filipe Miguel Tavares de Azevedo, pelo apoio, dedicação e tempo despendido na realização desta Dissertação de Mestrado. Ao Eng. Joaquim Bidarra da REFER por todo o apoio e disponibilidade.

Aos meus pais, à minha mãe Humberta Machado da Cunha e ao meu pai Francisco Dias da Silva, por toda a confiança e apoio incondicional, não só ao longo deste projeto, mas durante toda a vida.

Gostaria de agradecer também à minha namorada Paula Cristina da Cunha Assunção, pelo seu apoio absoluto, e paciência em todos os momentos durante a realização desta dissertação.

Finalmente a todos os docentes e funcionários do ISEP, em especial aos professores que fui tendo em todo o meu percurso académico, pois sem eles nada disto seria possível.

O meu muito obrigado a todos.



## Resumo

A rede de transporte ferroviária é um meio de transporte seguro, rápido e bastante utilizado pela população. Este facto fez com que os sistemas elétricos de tração tivessem uma grande evolução ao longo dos últimos anos nomeadamente, ao nível da alta velocidade. Por essa razão, é pertinente uma análise cuidada do impacto destes sistemas na rede de transporte.

Neste trabalho é efetuado um pequeno resumo sobre os sistemas elétricos de tração desde as subestações até à alimentação das locomotivas. Aborda-se também a rede de transporte que se encontra a montante do sistema de tração que sofre perturbações provocadas pelos sistemas de tração.

Por último realizou-se uma análise do impacto do sistema de tração na rede de transporte recorrendo à simulação no MATLAB<sup>TM</sup>/Simulink. Analisou-se um conjunto de grandezas elétricas para diversos cenários, considerando a alimentação da catenária a 1x25 kV e 2x25 kV.



## Abstract

The railway transportation network is a safe and quick transport means, so widely used by the population, this fact meant that the electrical traction had a great evolution. Because of that it has been necessary a careful analysis of the impact of these systems on the transport network.

In this dissertation we make a short summary of the electrical traction system from its substations to power locomotives, we also speak of the transmission grid which is in the upstream of the traction system, suffering all impacts that may occur in the electrical traction system.

We also do a study of the impacts caused by the traction system on the transmission grid, through a mathematical calculation software, analyzing all the magnitudes of the electric system for various scenarios, with catenaries powered in the 1x25 kV and 2x25 kV.



## ÍNDICE

Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	v
Abstract.....	vii
Lista de Figuras .....	xiii
Lista de Tabela .....	xvii
Lista de Siglas e Abreviaturas .....	xix
Simbologia.....	xxi
Definições .....	xxiii
Capítulo 1 .....	1
Introdução.....	1
1.1 Objetivos do Trabalho.....	3
1.2 Estrutura da Dissertação .....	3
Capítulo 2 .....	5
Trânsito de Potência Trifásico .....	5
2.1 Rede de Transmissão .....	6
2.2 Linha de Transmissão.....	7
2.3 Transformador .....	9
2.3.1 Banco Trifásico de Transformadores .....	11
2.3.2 Ligações de Transformadores de Potência Trifásicos .....	12
2.3.2.1 Ligação Estrela-Estrela.....	12
2.3.2.2 Ligação Triângulo-Triângulo.....	13
2.3.2.3 Ligação Triângulo-Estrela e Estrela-Triângulo.....	14
2.3.3 Ligação dos Enrolamentos .....	15
2.3.4 Autotransformador .....	16
2.4 Máquina Síncrona .....	17
2.4.1 Partes Construtivas de uma Máquina Síncrona .....	18
2.4.1.1 Estator .....	18
2.4.1.2 Rotor .....	19
2.4.1.3 Conjunto Escovas e Anéis e Sistema Brushless .....	21
2.4.2 Modelo da Máquina Síncrona .....	22
2.4.3 Valores Nominais .....	25
2.4.3.1 Tensão Nominal .....	25
2.4.3.2 Potência Nominal (Gerador).....	25
2.4.3.3 Rendimento .....	26
2.4.3.4 Frequência .....	26

2.5 Conclusões .....	27
<b>Capítulo 3 .....</b>	<b>29</b>
<b>Subestações de Tração .....</b>	<b>29</b>
3.1 Subestação 1x25kV - Ligação Bifásica e Ligação Trifásica ou em “V” .....	32
3.1.1 Ligação Bifásica.....	32
3.1.2 Ligação Trifásica ou em “V”.....	33
3.1.3 Zonas Neutras entre Subestações.....	34
3.1.4 Subestações 1x25 kV.....	35
3.2 Subestação 2x25kV - Ligação Bifásica + Autotransformadores .....	36
3.3 Impactos da Subestação de Tração na Rede de Transmissão .....	38
3.4 Conclusões .....	38
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>39</b>
<b>Alimentação da Catenária.....</b>	<b>39</b>
4.1 Alimentação 1x25 kV .....	42
4.2 Alimentação 2x25 kV .....	42
4.3 Conclusões .....	44
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>45</b>
<b>Retorno de Corrente da Tração.....</b>	<b>45</b>
5.1 Sistema Standard.....	47
5.2 Sistema com Condutor de Retorno .....	48
5.3 Sistema Autotransformador .....	49
5.4 Comparação entre Sistemas de Retorno .....	51
5.5 Tipos de Conexões do Sistema de Ligação à Terra .....	51
5.5.1 LTI - Ligação Transversal Integral (Via Única).....	53
5.5.2 LEAE - Ligação Equipotencial Aéreo / Enterrado (Via Dupla).....	53
5.6 Manutenção do Sistema de Retorno da Corrente de Tração, Terras e Proteção .....	54
5.7 Conclusões .....	55
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>57</b>
<b>Simulação do Impacto na Rede do Sistema de Tração Elétrica .....</b>	<b>57</b>
6.1 Configuração da Rede .....	58
6.1.1 Rede de Alimentação .....	59
6.1.2 Linha de Alimentação MAT.....	59
6.1.3 Subestação Abaixadora.....	59
6.1.4 Linha AT.....	59
6.1.5 Subestação de Tração .....	60
6.1.5.1 Subestações de Tração 1x25kV .....	60
6.1.5.2 Subestações de Tração 2x25kV .....	60

6.1.6	Catenárias .....	61
6.1.6.1	Catenária 1x25 kV.....	61
6.1.6.2	Catenária 2x25 kV.....	61
6.1.7	Autotransformadores .....	61
6.2	Configuração da Locomotiva .....	62
6.3	Sistema 1x25 kV .....	63
6.3.1	Cenário 1 .....	65
6.3.2	Cenário 2 .....	67
6.3.3	Cenário 3 .....	68
6.3.4	Cenário 4 .....	70
6.4	Sistema 2x25 kV .....	73
6.4.1	Cenário 1 .....	76
6.4.2	Cenário 2 .....	77
6.4.3	Cenário 3 .....	79
6.4.4	Cenário 4 .....	80
6.5	Conclusões .....	83
<b>Capítulo 7</b>	.....	<b>85</b>
<b>Conclusão</b>	.....	<b>85</b>
7.1	Trabalhos Futuros.....	87
<b>Capítulo 8</b>	.....	<b>89</b>
<b>Referências e Anexos</b>	.....	<b>89</b>
8.1	Referências Bibliográficas .....	89
8.2	Anexos .....	93
8.2.1	Anexo 1 .....	93
8.2.2	Anexo 2 .....	94



## Lista de Figuras

Figura 1 - Perfil da linha de Sintra .....	2
Figura 2 - Sistema elétrico de transmissão .....	7
Figura 3 - Estrutura dupla de linha de transmissão .....	8
Figura 4 - Transformador trifásico de imersão a óleo de 20 MVA.....	10
Figura 5 - Detalhe do núcleo de um transformador de potência.....	11
Figura 6 - Tipos de ligação dos enrolamentos do transformador .....	15
Figura 7 - Esquema autotransformador .....	16
Figura 8 - Representação esquemática de uma máquina síncrona elementar de polos salientes.....	18
Figura 9 - (a) Ranhura do estator de baixa tensão, (b) Ranhura do estator de alta tensão.....	19
Figura 10 - Máquina de polos salientes (a) e polos lisos (b) .....	21
Figura 11 - Sistema de excitação sem anéis e escovas, sistema Brushless .....	22
Figura 12 - Esquemas equivalentes da máquina síncrona .....	22
Figura 13 - Convenções utilizadas no estudo das máquinas síncronas .....	23
Figura 14 - Diagrama vetorial da máquina síncrona em regime não saturado .....	24
Figura 15 - Representação esquemática básica de uma subestação de tração.....	30
Figura 16 - Esquema subestação bifásica .....	32
Figura 17 - Esquema da subestação trifásica com ligação em "V" .....	33
Figura 18 - Esquema das zonas neutras entre subestações .....	34
Figura 19 - Esquema alimentação 2x25 kV.....	37

Figura 20 - Sistema de alimentação 1x25 kV .....	41
Figura 21 - Sistema de alimentação 2x25 kV .....	41
Figura 22 - Ligação redundante do carril .....	46
Figura 23 - Sistema standard.....	47
Figura 24 - Distribuição do campo magnético no sistema standard .....	48
Figura 25 - Sistema com condutores de retorno .....	48
Figura 26 - Distribuição do campo magnético no sistema com condutor de retorno .	49
Figura 27 - Sistema autotransformador .....	50
Figura 28 - Distribuição do campo magnético no sistema autotransformador .....	50
Figura 29 - Comparação entre sistemas de retorno .....	51
Figura 30 - Rede simulada .....	58
Figura 31 - Corrente elétrica consumida em função da velocidade .....	62
Figura 32 - Tensão da rede em vazio .....	64
Figura 33 - Corrente na rede em vazio .....	64
Figura 34 - Tensão da rede cenário 1.....	65
Figura 35 - Corrente na rede cenário 1.....	66
Figura 36 - Tensão da rede cenário 2.....	67
Figura 37 - Corrente na rede cenário 2.....	67
Figura 38 - Tensão da rede cenário 3.....	68
Figura 39 - Corrente na rede cenário 3.....	69
Figura 40 - Tensão da rede cenário 4 - desacoplamento de carga.....	71
Figura 41 - Tensão da rede cenário 4 - acoplamento de carga.....	71
Figura 42 - Corrente na rede cenário 4 - desacoplamento de carga .....	72
Figura 43 - Corrente na rede cenário 4 - acoplamento de carga.....	72
Figura 44 - Tensão da rede em vazio .....	74
Figura 45 - Corrente na rede em vazio .....	75
Figura 46 - Tensão da rede cenário 1.....	76

---

Figura 47 - Corrente na rede cenário 1 .....	76
Figura 48 - Tensão da rede cenário 2.....	77
Figura 49 - Corrente na rede cenário 2 .....	78
Figura 50 - Tensão da rede cenário 3.....	79
Figura 51 - Corrente na rede cenário 3 .....	79
Figura 52 - Tensão da rede cenário 4 - desacoplamento de carga.....	81
Figura 53 - Tensão da rede cenário 4 - acoplamento de carga.....	81
Figura 54 - Corrente na rede cenário 4 - desacoplamento de carga .....	82
Figura 55 - Corrente na rede cenário 4 - acoplamento de carga .....	82



## Lista de Tabela

Tabela 1 - Diferenças entre alternadores hidráulicos e turbo alternadores .....	24
Tabela 2 - Subestações 1x25 kV .....	35
Tabela 3 - Subestações 2x25 kV .....	36
Tabela 4 - Distância entre as ligações transversais .....	52
Tabela 5 - Características da Locomotiva .....	62



## Lista de Siglas e Abreviaturas

AT	Alta Tensão
AT	sistema com Autotransformadores
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCFP	Companhia Carris de Ferro do Porto
CDTA	Cabo De Terra Aéreo
CDTE	Cabo De Terra Enterrado
EDP	Energias De Portugal
f.e.m.	Força Eletromotriz
f.m.m.	Força Magnetomotriz
HF	High Frequency
LEAE	Ligação Equipotencial Aéreo/Enterrado
LTI	Ligação Transversal Integral
MAT	Muito Alta Tensão
MT	Média Tensão
OMI	Óleo Mineral Isolante
PCT	Posto Central de Telecomando
pk	Ponto Quilómetro
PR	Plano de Referencia
RCT	Retorno de Corrente de Tração
REFER	Rede Ferroviária Nacional
REN	Rede Elétrica Nacional
rpm	Rotações Por Minuto
RT	sistema com condutor de Retorno
SP	postos de Seccionamento e Paralelo

SS	postos de Subseccionamento
SSP	postos de Subseccionamento e Paralelo
ST	sistema Standard
TI	Transformador de Intensidade
TP	Terras de Proteção
TP	Transformador de Potência
TT	Transformador de Tensão
UQE	Unidades Quadruplas Elétricas
UTE	Unidades Triplas Elétricas

## Simbologia

$B_L$	Capacitância da linha
$\cos(\varphi)$	Fator de potência
$f$	Frequência
$F$	Força magnetomotriz
$I$	Corrente
$I_l$	Corrente de linha
$m$	Relação de transformação
$\eta$	Rendimento
$N$	Número de espiras
$n_s$	Rotação da máquina primária
$p$	Número de polos da máquina
$P$	Potência ativa
$P_e$	Potência elétrica fornecida
$P_m$	Potência mecânica fornecida
$P_p$	Perdas
$R$	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, excepcionalmente 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, eléctrodos de terra e respetivas 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.

**Eléctrodo de terra** - conjunto de materiais condutores enterrados destinados a assegurar boa ligação elétrica com a terra e ligado num único ponto (ligador do eléctrodo) 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 suposto o condutor ou o cabo de terra não desviados pelo vento.

**Força de rotura de um condutor ou cabo de terra** - força de rotura estipulada para efeitos de receção.

**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.

**Força de compensação** - força de tração que é mantida constante numa certa gama de temperaturas nos condutores compensados.

**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.

**Implantação do maciço** - distância medida na horizontal entre o eixo da cavidade e a face do carril mais próximo do poste.

**Implantação do poste** - distância medida na horizontal entre a aba do poste mais próxima do carril e a face do carril mais próximo do poste

**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.

**Nivelamento** - a distância medida na vertical entre o topo do maciço e um plano de referência. O nivelamento considera-se negativo quando o topo de maciço estiver abaixo do plano de referência e positivo no caso contrário.

**Obra de arte** - designação genérica para pontes, viadutos, passagens superiores ou qualquer estrutura existente construída sobre o caminho-de-ferro.

**Paralelismo** - posição relativa de uma linha elétrica com outra canalização elétrica ou não num troço de aproximação quando a variação de afastamento entre elas não exceder 5% da média dos valores extremos desse afastamento.

**Paralelo transversal** - ligação entre os troços de catenárias de vias múltiplas, via A e D de uma via dupla.

**Passagem de nível** - travessia de nível do caminho-de-ferro com uma estrada ou caminho.

**Passagem superior** - travessia do caminho-de-ferro por uma estrada ou caminho de peões a nível superior ao do caminho-de-ferro.

**Passagem inferior** - travessia do caminho-de-ferro por uma estrada ou caminho de peões a nível inferior ao do caminho-de-ferro.

**Plano de referência** - em vias de equipamento em consolas, o PR é o plano horizontal que passa no ponto onde o plano médio de rolamento intersecta o eixo da via. Em vias com equipamento em pórtico, o PR é o plano na horizontal que passa no ponto onde o PMR da via de referência corta o eixo da via.

**Ponte** - obra de engenharia civil que suporta a via-férrea na travessia de um rio.

**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 eletrodo de terra e um eletrodo de terra auxiliar suficientemente afastados entre si de forma que ao escoar-se uma corrente pelo eletrodo de terra, não seja sensivelmente modificado o potencial do eletrodo 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 mais elevada da rede** - tensão mais elevada que aparece num instante e num ponto qualquer da rede nas condições normais de exploração entre a instalação e o condutor de retorno.

**Tensão mais elevada do material** - tensão entre a instalação e o condutor de retorno, para o qual o material circulante é especificado em termos de isolamento e outras características.

**Tensão (mecânica) máxima de tração** - quociente entre a força máxima de tração e a secção efetiva do condutor ou cabo de terra.

**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.

**Viaduto** - obra de engenharia civil que suporta a via-férrea na travessia de um vale ou linhas de água, podendo ou não atravessar estradas ou caminhos.

**Vizinhança de uma linha aérea** - proximidade, sem cruzamento nem travessia, de uma catenária com outra canalização elétrica ou não, com uma via pública ou particular, em condições tais que por acidente os elementos de uma delas possam atingir os elementos da outra ou afetar a sua segurança.

**Vizinhança de uma linha subterrânea** - proximidade, sem cruzamento nem travessia, de uma linha subterrânea com outra canalização elétrica ou não, em condições tais que, por acidente, os elementos de uma delas possam afetar a segurança de qualquer delas.

**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 eléctrodo de terra respetivo quando percorrido por uma corrente elétrica.

**Zona de gelo** - zona com condições climatéricas que poderão originar acumulação de neve ou gelo nos elementos da linha.

**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.

**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

A tração elétrica em Portugal teve início com a tração elétrica urbana. Foram as companhias privadas de transporte de público que introduziram os primeiros veículos de tração elétrica em Portugal.

Em 1887 a Companhia de Caminhos de Ferro de Lisboa fez experiências, as quais foram inconclusivas, com um veículo eletrificado e alimentado por acumuladores. 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 durante muitos anos serviu a cidade e a periferia. Em 1958 começou a ser reduzida com a introdução dos troleicarros.

Em 1959 iniciou-se a utilização dos troleicarros, e começou-se a desenvolver a rede de transportes elétricos rodoviários, na região metropolitana do Porto. Construíram-se também redes de transportes elétricos urbanos nas regiões metropolitanas de Braga, Coimbra e de Lisboa, e realizaram-se experiências de tração elétrica na cidade da Maia.

Em Lisboa a 30 de Dezembro de 1959 teve início a exploração da rede metropolitana, um sistema de tração elétrica em corrente contínua com uma tensão de 750 V. Em 1980 a rede tinha uma extensão de 11,931 km, tendo sido nos últimos anos muito aumentada. As locomotivas eram constituídas por carruagens automotoras assentes em dois *bogies*, com cabinas de condução nas extremidades, a captação da corrente elétrica era feita por dispositivos de colocação de sapatas num terceiro

carril, sendo o retorno feito através dos carris. Inicialmente a motorização era feita com motores de corrente contínua, encontrando-se já em funcionamento carruagens com motorização trifásica com motor de indução.

A linha do Norte encontra-se eletrificada em corrente alternada monofásica com frequência industrial, 25 kV, 50 Hz, estendendo-se de Lisboa ao Porto, esta foi ligada à rede elétrica nacional através de subestações de transformação a 63 kV. Esta linha é percorrida por veículos com motorização composta por motores de coletor de lâminas e, recentemente, por motores de indução. Ainda ligada a esta linha principal encontram-se eletrificados os ramais de Coimbra A - Coimbra B, e a linha da Figueira da Foz.

A linha de Sintra está também eletrificada em tensão alternada monofásica, 25 kV, 50 Hz, e liga Lisboa-Rossio a Sintra. O perfil desta linha é bastante inclinado idêntico ao de uma linha de montanha. Esta linha é essencialmente percorrida por unidades triplas elétricas (UTE), também sendo percorrida por unidades quadruplas elétricas (UQE), com acionamento trifásico por motores elétricos de indução.

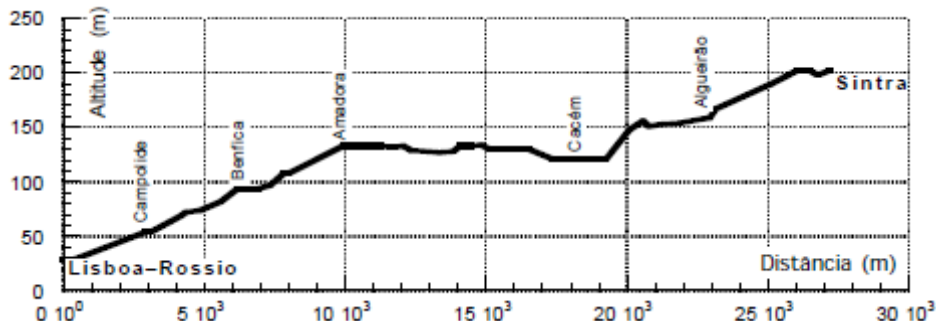


Figura 1 - Perfil da linha de Sintra

A linha de Cascais estende-se de Lisboa-Cais do Sodré até Cascais, estando esta eletrificada em corrente contínua a 1500 V, e foi a primeira linha de caminho-de-ferro eletrificada em Portugal em 1926.

A linha da Beira Alta é uma linha de via larga entre Pampilhosa e Vilar Formoso, tendo uma extensão de 202 Km, possui subestações de tração do sistema 2x25 kV a 50 Hz, sendo alimentadas a 220 kV, em Mortágua, Gouveia e Sobral.

A linha do Minho encontra-se eletrificada em via dupla 1x25 kV, estendendo-se até Braga e Guimarães.

A linha do Douro esta eletrificada ate Caide, em via dupla e em exploração suburbana [1].

Um mapa onde constam todas as linhas elétricas da REFER pode ser visto no Anexo 1.

## 1.1 Objetivos do Trabalho

Tal como o título da presente dissertação indica, este trabalho tem por objetivo a análise do impacto da rede de tração elétrica (sistema convencional 1x25 kV e sistema 2x25 kV) na rede de transmissão.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em 7 capítulos. O capítulo atual é o capítulo 1 e faz uma pequena abordagem ao tema em estudo na presente dissertação.

No capítulo 2 é feita uma abordagem aos sistemas de trânsito de potência e aos pontos mais importantes no estudo realizado nomeadamente: rede de transmissão, linha de transmissão, transformadores de potência e a máquina elétrica síncrona.

Seguidamente no capítulo 3 são abordadas as subestações de tração que recorrem aos sistemas de alimentação a 1x25 kV e a 2x25 kV, referindo a sua constituição, os tipos de ligação, o que são zonas neutras e a sua constituição a nível nacional.

A alimentação da catenária nos sistemas 1x25 kV e 2x25 kV é descrita sucintamente no capítulo 4.

No capítulo seguinte, capítulo 5, abordou-se o sistema de retorno de corrente de tração, referindo a sua importância e os tipos de sistemas existentes. Tratou-se ainda

dos tipos de ligações do sistema de ligação à terra e a manutenção deste mesmo sistema.

Depois de configurada uma rede tipo e simulados diferentes cenários de carga, no capítulo 6 é analisado o impacto da rede de tração na rede de transmissão.

Finalmente, no capítulo 7, são efetuadas as conclusões e considerações finais bem como as sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### Trânsito de Potência Trifásico

Ao contrário de outros serviços ou bens a energia elétrica é gerada no instante em que é consumida, sendo a capacidade desta ser armazenada muito reduzida. Devido às suas características, é necessário existir um controlo e ajustes constantes, de modo a que a energia consumida iguale a produzida.

Em condições normais de operação, o sistema de transporte de energia opera em regime estacionário, e o cálculo básico utilizado para determinar as características deste estado de operação designando se de trânsito de energia (*Load Flow*). O cálculo resulta na determinação das amplitudes e ângulos das tensões, fluxo de energia ativa e reativa em cada elemento de transmissão, perdas e energia reativa gerada ou absorvida em barramentos de tensão controlada. Os métodos de cálculo mais utilizados para o cálculo do trânsito de energia são o *Newton-Raphson* e outros que dele derivam, nomeadamente o Desacoplamento Rápido.

A quantidade de energia que circula numa linha num dado momento depende da energia produzida e o seu despacho, do consumo por parte do utilizador, do estado de outras linhas e seus equipamentos associados, e também das condições atmosféricas.

A rede de transmissão deve suportar diferentes configurações da rede, saídas de cargas inesperadas, cortes planeados de grupos geradores ou equipamentos da rede para manutenção, condições atmosféricas extremas e outros desafios [2,3].

## 2.1 Rede de Transmissão

A rede de transmissão elétrica nacional é atualmente operada pela REN, e a 31 de Dezembro de 2012 tinha uma extensão de 8 371 Km, e 65 subestações ao serviço [4].

O sistema de transmissão de energia elétrica é mais complexo e dinâmico do que os outros sistemas essenciais, tais como a água ou gás natural. A eletricidade flui de geradores de energia, por meio de transformadores e linhas de transmissão, subestações, linhas de distribuição, e finalmente, para o consumidor de eletricidade (Figura 2). O sistema elétrico é altamente complexo e possui uma impedância quase infinita, o que o torna bastante estável.

A interligação do sistema significa que a rede de transmissão funciona como uma única entidade. A energia entra no sistema e flui ao longo de todos os caminhos disponíveis, não apenas do ponto "A" ao ponto "B". O sistema não reconhece divisões entre áreas de serviço, municípios, estados ou até países.

A rede de transmissão atual inclui não apenas linhas de transmissão que vão dos grupos geradores de energia até aos centros de consumo, mas também uma rede emalhada, proporcionando assim um sistema redundante que ajuda a garantir um melhor fluxo de energia. Se uma linha de transmissão é retirada de serviço, a energia flui normalmente através de outras linhas de energia de modo a chegar ao cliente final.

Basicamente a energia elétrica produzidas nas centrais elétricas é absorvida pela rede de transmissão, e depois distribuída pelas diversas cargas existentes na rede. Este sistema de rede ajuda a atingir uma alta confiabilidade para o fornecimento de energia. Qualquer uma das centrais constitui apenas uma fração da energia a ser entregue pela rede para satisfazer as necessidades de procura instantânea.

Esta partilha de energia significa também que esta é fornecida a partir de uma diversidade de fontes (e.g. carvão, gás natural, petróleo ou outras fontes de energia renováveis, como a hídrica, biomassa, eólica ou solar) [2].

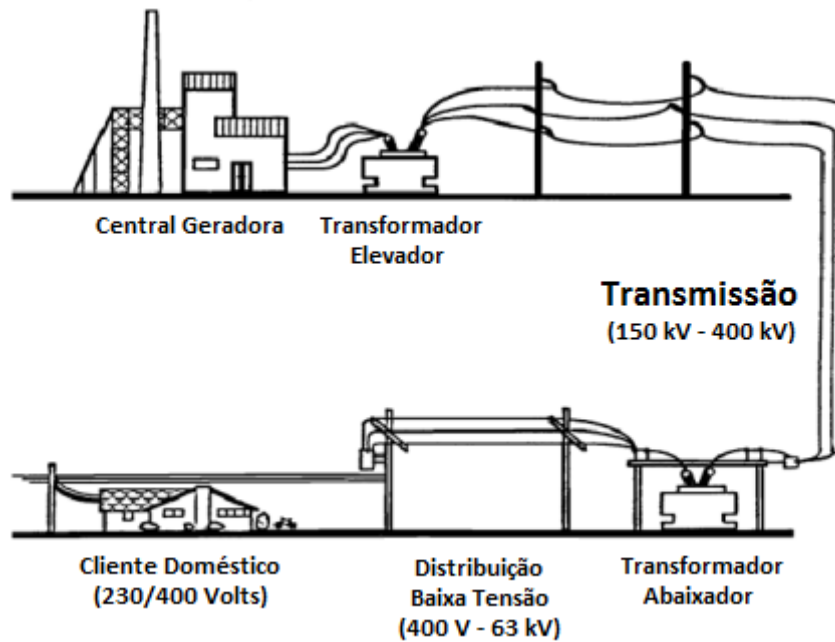


Figura 2 - Sistema elétrico de transmissão

## 2.2 Linha de Transmissão

A linha de transmissão é uma parte vital do sistema de transmissão de energia, pois faz a ligação entre a geração e a carga. As linhas de transmissão funcionam a tensões de 150 kV, 220 kV ou 400 kV, e estão idealmente conectadas entre elas ou a equipamentos com o melhor aperto possível, de maneira a minimizar as perdas por efeito de joule.

Numa estrutura de transmissão, os três cabos de maior secção são denominados de condutores e transportam a energia elétrica. Existem também uns cabos de menor secção, normalmente um ou dois, dependendo da configuração da estrutura, que são chamados de cabos de guarda. Os cabos de guarda são dimensionados para proteger os cabos de tensão de descargas atmosféricas, e podem também conter cabos de comunicação em fibra ótica.

Fatores como o mercado elétrico, a economia e requisitos ambientais levaram as linhas de transmissão a funcionar nos seus limites operacionais. Assim qualquer falha, se não for detetada e isolada rapidamente despoletará em cascata uma perturbação de todo o sistema, o que para um sistema fortemente interligado e a operar perto dos seus limites será sinónimo de interrupções generalizadas.

Os sistemas de proteção de linhas de transmissão são projetados para identificar e localizar falhas e isolar apenas a secção em defeito. O principal desafio para a proteção da linha de transmissão é encontrar uma forma fiável de detetar e isolar as falhas que comprometem a segurança do sistema.

A Figura 3 mostra um exemplo de duas linhas de 220 kV numa estrutura de transmissão dupla, o que significa que a mesma estrutura metálica suporta dois conjuntos de linhas de transmissão, cada um com três condutores.

As linhas de transmissão passam a uma maior altitude que as linhas de distribuição mais comuns que existem ao longo das estradas rurais ou ruas de cidades.



**Figura 3 - Estrutura dupla de linha de transmissão**

Estruturas de transmissão diferentes têm diferentes materiais e custos de construção, distâncias entre as estruturas (comprimento do vão) e altura de amarração. Estas estruturas variam também com as diferentes tensões das linhas.

A altura da estrutura e as limitações de capacidade de carga controlam o comprimento do vão permitido com base na distância ao solo ou na capacidade de suportar ventos fortes e cargas de gelo. Em áreas onde uma estrutura de poste único é preferível, solos fracos ou molhado podem exigir fundações de betão para apoio.

Quando uma linha de transmissão deve atravessar uma rua ou mudar um pouco de direção, podem ser necessárias estruturas de ângulo, normalmente maiores, ou cabos de amarração.

Postes com cabos de amarração afetam uma área muito maior. Estruturas de ângulo têm geralmente mais do que o dobro do diâmetro dos outros postes de aço. Estes são feitos de aço, e têm uma grande fundação de betão. O diâmetro do poste e a profundidade a que a base é enterrada depende das condições do solo e a tensão da linha [2, 5].

## 2.3 Transformador

Transformadores são máquinas elétricas estáticas, pois não possuem partes em movimento, usados nos sistemas elétricos de energia para transferir potência entre circuitos através de indução magnética, mantendo a mesma frequência e, normalmente, variando valores de corrente e de tensão.

O termo Transformador de potência é usado para nos referirmos aos transformadores usados no sistema de transmissão elétrica, sendo equipamentos de extrema importância e alto custo no contexto dos sistemas elétricos de energia.

A rede de transmissão consiste num elevado número de centrais geradoras, pontos de distribuição e centrais de transformação de energia. A complexidade do sistema leva à existência de diversas tensões de transmissão. Transformadores de potência devem ser utilizados em cada um destes pontos onde existe uma transição entre níveis de tensão. De um modo geral estes transformadores servem para reduzir as perdas em transmissão por redução da corrente requerida para transmitir uma determinada potência elétrica. Existem também perdas associadas ao transformador de potência, que dependem normalmente, da construção do transformador, do seu regime de funcionamento e da sua manutenção.

Os transformadores de potência são escolhidos em função da aplicação a que se destinam, sendo que quando maior a potência do transformador mais usualmente este é feito por medida. Transformadores usados em interior são normalmente do

tipo seco, transformadores usados em exterior são normalmente de imersão em óleo. Um transformador exterior de imersão em óleo pode ser visto na Figura 4.



**Figura 4 - Transformador trifásico de imersão a óleo de 20 MVA**

A parte principal de um transformador é o seu sistema de isolamento, que pode ser constituído por um líquido, o Óleo Mineral Isolante (OMI), ou uma isolação solida, o papel isolante elétrico. Na Figura 5 podemos ver um esquema de um núcleo de transformador, ilustrando o uso do papel.

Também fazem parte do núcleo do transformador resinas e fibras, que são empregadas com a finalidade de fixar os componentes isolantes e magnéticos. De modo a garantir a vedação e a proteção do equipamento são utilizados materiais elastoméricos e tintas compatíveis com o OMI.

Durante o funcionamento deste tipo de transformadores vários processos de desgaste e de envelhecimento ocorrem no sistema de isolamento, daí que, efeitos de fadiga térmica, química, elétrica e mecânica devem ser monitorizados de modo a garantir a eficiência do equipamento, permitindo intervenções de manutenção preditiva, a fim de evitar parar os equipamentos e, conseqüentemente, aumento de custos. Como exemplos de efeitos que são responsáveis por alterações do sistema isolante temos, pontos quentes, sobreaquecimentos, sobretensões e vibrações.

De uma maneira geral a vida útil dos transformadores está relacionada com a qualidade dos materiais dielétricos utilizados durante o processo construtivo, mas o



suprimento de energia pode ser parcialmente garantido com apenas dois transformadores, o que não é possível quando ocorre um defeito num transformador trifásico. O banco trifásico tem também a vantagem de se transportar mais facilmente, mas é um transformador que ocupa mais espaço e é mais pesado, em comparação com o transformador trifásico devido a este último ter um circuito magnético comum. O transformador trifásico apresenta também um melhor rendimento quando comparado com um banco trifásico de transformadores [7, 8, 9].

## **2.3.2 Ligações de Transformadores de Potência Trifásicos**

Quer para um transformador trifásico quer para um banco trifásico, o primário ou o secundário podem ser ligados em estrela ou em triângulo, podendo ou não a ligação em estrela ser ligada à terra. Contudo nem todas as ligações funcionarão satisfatoriamente. Depende do tipo de construção do transformador, das características da carga, e da alimentação. Algumas das ligações mais comuns serão apresentadas de seguida [7].

### **2.3.2.1 Ligação Estrela-Estrela**

Quando unidos os terminais dos enrolamentos semelhantes com a mesma polaridade obtemos o neutro da ligação em estrela. Este ponto neutro está disponível e pode ser utilizado para qualquer finalidade desejada (e.g. ligá-lo à terra, criar um ponto zero para medições de corrente e proteção, etc.). Para sistemas de transmissão de alta tensão, a utilização deste tipo de ligação é mais económica pois a tensão aplicada a cada enrolamento é 1,73 inferior à tensão composta. Se o ponto neutro está ligado à terra, não é necessário isolá-lo para a tensão de linha.

Se o ponto neutro não estiver ligado à terra, a corrente de defeito durante uma sobreintensidade monofásica é insignificante devido à ausência de um caminho entre a terra e o transformador. Se o neutro é ligado à terra e o transformador é feito com um núcleo de três colunas, a impedância do circuito continua a ser elevada. Como resultado, as correntes de defeito durante uma falha monofásica entre uma linha e a terra, são relativamente baixas.

Com este tipo de ligação, as tensões são simétricas no que diz respeito às linhas em causa, mas os transformadores introduzem harmónicos de terceira ordem, ou múltiplos da terceira ordem, assim como dissimetrias de tensão e corrente entre linhas e o neutro. A tensão harmónica de terceira ordem é um fenómeno de sequência zero e, assim, aparece no mesmo sentido em todas as fases. Se os neutros de transformadores e geradores estiverem aterrados, as correntes harmónicas de terceira ordem podem criar interferências em circuitos telefónicos. Se o neutro do transformador não estiver ligado à terra, a tensão harmónica de terceira ordem no ponto neutro será somada a todas as três fases, e a tensão de neutro irá oscilar em torno do ponto zero, três vezes a frequência do sistema. Tensões harmónicas de terceira ordem são também criadas nas linhas, o que pode sujeitar o sistema de alimentação a sobretensões perigosas devido à ressonância com a capacitância de linha.

Para qualquer ligação trifásica de três núcleos, a impedância do fluxo harmónico de terceira ordem é relativamente alta devido ao acoplamento magnético entre as três fases, resultando numa tensão mais equilibrada de neutro.

Um enrolamento em triângulo pode ser adicionado na ligação em estrela-estrela para fornecer um caminho para correntes harmónicas de terceira ordem e de sequência zero. Além disso também ajuda a equilibrar a tensão de neutro. Este enrolamento será necessário para conduzir toda a corrente de defeito de sequência zero durante um defeito monofásico linha-terra [7].

### **2.3.2.2 Ligação Triângulo-Triângulo**

A ligação triângulo-triângulo tem uma vantagem económica em relação à ligação estrela-estrela para baixas tensões e altas correntes, pois as correntes no enrolamento é reduzida por um fator de 1,73 a 58% do que na ligação estrela-estrela.

Uma simetria de tensão e corrente em relação às três linhas é obtida apenas nas ligações em triângulo e em zig-zag. Transformadores ligados em triângulo não introduzem harmónicos de terceira ordem ou seus múltiplos nas linhas de energia. Os harmónicos de terceira ordem induzidos por tensão são separados por 360°. Eles estão portanto todos em fase e causam uma corrente harmónica de terceira ordem que circula no enrolamento em triângulo. Esta corrente harmónica de terceira

ordem, funciona como corrente de excitação e induz uma tensão harmônica da mesma ordem, em cada enrolamento que se encontra em oposição ao componente harmônico de terceira ordem de tensão, que foi originalmente induzida pela corrente de excitação sinusoidal das linhas. Como resultado, a harmônica de terceira ordem é eliminada a partir da segunda tensão.

Uma outra vantagem da ligação triângulo-triângulo, através de banco de transformadores, é que um transformador pode ser removido e as restantes duas fases funcionam a 86,6% da sua capacidade numa ligação triângulo em aberto.

A principal desvantagem da ligação triângulo-triângulo é que o neutro não está acessível. O sistema de isolamento é mais caro porque este tipo de ligação trifásica, durante um defeito do sistema ou tensões transitórias, possui tensões mais elevadas em relação à terra. O fornecimento de um neutro artificial ao sistema através de um autotransformador com os enrolamentos ligados em zigue-zague pode ajudar a controlar estas tensões. O custo do isolamento da ligação em triângulo aumenta com o aumento da tensão. Consequentemente, este tipo de ligação é normalmente limitada a uma tensão máxima do sistema de 220 kV.

Diferenças entre tensões de fases individuais fazem com que uma corrente circule em ambos os enrolamentos, primários e secundários. Esta corrente é apenas limitada pela impedância dos transformadores e pela impedância de neutro. Diferenças nas impedâncias das diferentes fases provocam uma divisão desigual da carga entre as fases. Uma corrente que seja extraída a partir dos terminais de uma fase do secundário fluirá nos enrolamentos de todas as três fases. A corrente entre as fases divide-se inversamente com a impedância dos caminhos paralelos entre os terminais.

### **2.3.2.3 Ligação Triângulo-Estrela e Estrela-Triângulo**

As ligações triângulo-estrela ou estrela-triângulo têm menos características indesejáveis do que qualquer outra ligação.

Em geral, esta ligação combina a maioria das vantagens das ligações estrela-estrela e triângulo-triângulo. A simetria de tensão e de corrente é conservada pela presença da ligação em triângulo. A corrente de excitação harmônica circula dentro do enrolamento em triângulo, e nenhuma tensão harmônica de terceira ordem

aparecerá nas tensões das fases no lado estrela. Os enrolamentos de alta tensão podem ser ligados em estrela, e o neutro pode ser ligado à terra para minimizar o custo de isolamento.

Diferenças na corrente de magnetização, de tensão ou de impedância entre as fases são ajustadas por uma pequena corrente que circula no enrolamento triângulo. Todos esses fatores resultam em tensões de fase desequilibradas no enrolamento triângulo, o que faz com que uma corrente circule dentro do triângulo.

Embora a ligação triângulo-estrela possuir a maior parte das vantagens da estrela-estrela e triângulo-triângulo, também tem várias desvantagens. Esta ligação apresenta uma mudança de fase de  $30^\circ$  entre os enrolamentos primário e secundário que tem de ser comparado para poder ser ligado em paralelo. Em caso de emergência um banco de transformadores triângulo-estrela não pode funcionar apenas com duas fases [7].

### 2.3.3 Ligação dos Enrolamentos

De seguida podemos observar os tipos de ligação mais comuns nos enrolamentos dos transformadores de potência trifásicos [8].

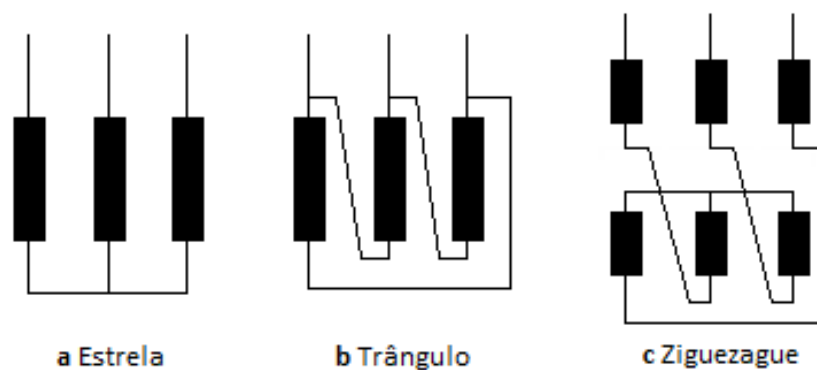


Figura 6 - Tipos de ligação dos enrolamentos do transformador

### 2.3.4 Autotransformador

Um autotransformador é uma máquina elétrica de construção e características similares a um transformador. A diferença é que apenas possui um enrolamento num núcleo ferromagnético, e deve possuir no mínimo três pontos de ligação. A tensão de entrada é ligada nos terminais que se encontram nos extremos ( $N_1$ ). O terceiro ponto de ligação é ligado à carga assim como um dos outros dois pontos ( $N_2$ ). Cada um dos lados terá uma tensão diferente e a tensão do lado secundário é alterada em função de onde se encontra ligado o ponto intermédio [8].

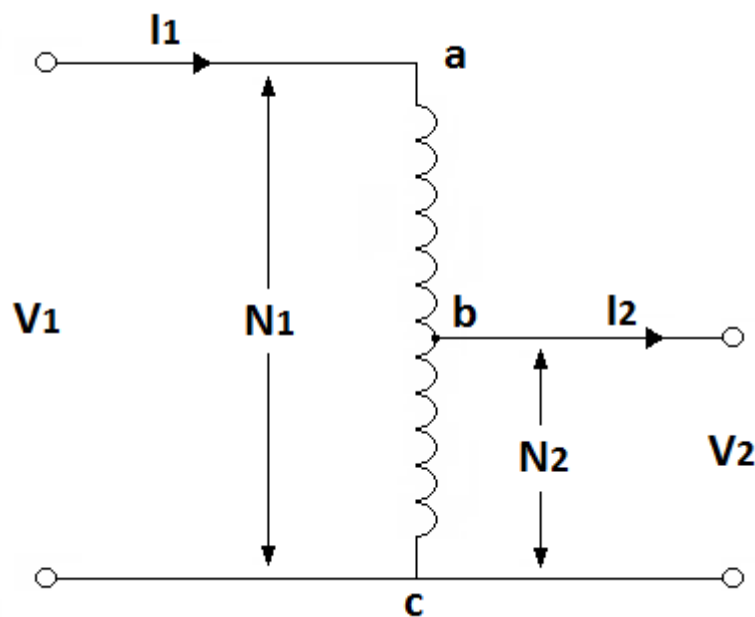


Figura 7 - Esquema autotransformador

Sendo todas as espiras “cortadas” pelo mesmo fluxo que atravessa o núcleo ferromagnético:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = m \quad (1)$$

A tensão no secundário pode variar desde  $0 < V_2 < V_1$

A força magnetomotriz obtida na metade superior (e.g. entre os pontos a e b) será:

$$F_U = (N_1 - N_2)I_1 = \left(1 - \frac{1}{m}\right)N_1I_1 \quad (2)$$

A força magnetomotriz obtida na metade inferior (e.g. entre os pontos b e c) será:

$$F_L = N_2(I_2 - I_1) = \frac{N_1}{m}(I_2 - I_1) \quad (3)$$

Pelas equações anteriores e, pelo balanço das forças magnetomotrizes, verifica-se que as correntes e as tensões se relacionam como no transformador de duas bobinagens, ou seja:

$$\left(1 - \frac{1}{m}\right) N_1 I_1 = \frac{N_1}{m}(I_2 - I_1) \quad (4)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{m} \quad (5)$$

Como vantagens deste tipo de transformador podemos referir o reduzido fluxo de fugas, assim como, uma reduzida corrente de excitação e assim menores perdas. A única desvantagem é a ausência de isolamento físico entre os lados primário e secundário.

## 2.4 Máquina Síncrona

As máquinas síncronas assim como as máquinas de corrente contínua e as máquinas de indução (assíncronas), podem ser utilizadas tanto como motores como geradores. Devido a razões construtivas, á possibilidade de se poder controlar a energia reactiva e ao seu custo mais elevado em relação às máquinas de indução, estas são mais utilizadas como geradores. Como motores elas são regra geral utilizadas para altas potências, normalmente acima de 600 CV, onde apresentam vantagens importantes em relação aos motores de indução.

Já as máquinas síncronas a ímanes permanentes são utilizadas cada vez mais em baixas e médias potências, especialmente quando se necessita de velocidade variável, alto rendimento e respostas dinâmicas rápidas.

Tanto as máquinas síncronas tradicionais de rotor bobinado como as máquinas síncronas a ímanes permanentes necessitam em geral de um conversor de frequência para o seu acionamento e controlo, caso seja necessários que elas operem como motor com velocidade variável.

A máquina síncrona é constituída pelo rotor e pelo estator. No rotor estão montados os enrolamentos indutores que são percorridos por uma corrente contínua e que tem como função a criação de um campo magnético intenso. No estator estão montados os enrolamentos induzidos nos quais se efetua a conversão eletromecânica de energia.

As correntes e tensões, em regime permanente, são alternadas no estator e contínuas no rotor. A ligação elétrica entre a parte móvel, o rotor, e o exterior pode fazer-se através de vários processos (e.g. utilização de anéis contínuos e escovas fixas) [10, 11].

## 2.4.1 Partes Construtivas de uma Máquina Síncrona

As partes construtivas principais de uma máquina síncrona, esquematizadas na Figura 8, serão discutidas de forma sucintamente nos próximos pontos.

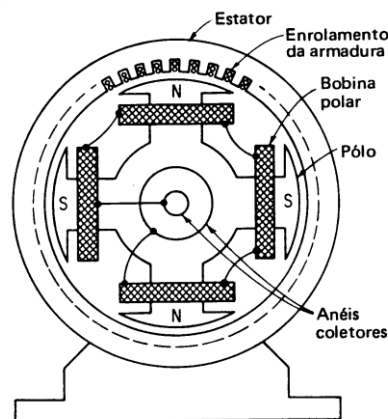


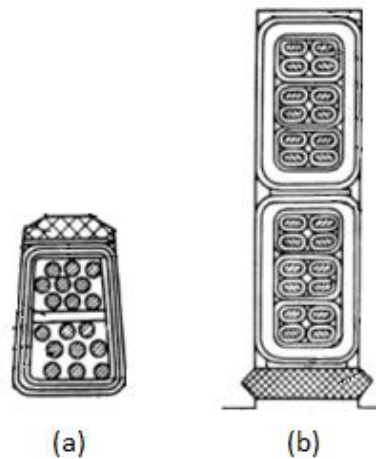
Figura 8 - Representação esquemática de uma máquina síncrona elementar de polos salientes

### 2.4.1.1 Estator

O estator da máquina síncrona é muito semelhante ao de um motor de indução. É composto por chapas laminadas dotadas de ranhuras axiais onde é alojado o enrolamento do estator. As chapas possuem características magnéticas de alta permeabilidade, criando um caminho magnético de baixa oposição para o fluxo, diminuindo assim o fluxo disperso e concentrando o campo no entreferro. O estator, o rotor e os restantes tipos de máquinas elétricas são construídos a partir de chapas de forma a diminuir as perdas provocadas por correntes parasitas (e.g. correntes de

*Foucault*). Caso fosse utilizada uma construção maciça essas correntes estariam presentes em maior número. Para além disso as chapas são geralmente tratadas termicamente a fim de reduzir o valor das perdas por correntes induzidas.

O enrolamento do estator pode ser tanto monofásico como trifásico, sendo em geral as máquinas síncronas trifásicas. Quando construídas para baixa tensão as bobinas do estator são formadas por fios com secção circular e esmaltados, as ranhuras do estator são neste caso do tipo semi-abertas (Figura 9a). No caso de enrolamentos de alta tensão os condutores são de secção retangular e as bobinas recebem uma camada extra de isolamento com material a base de mica. As ranhuras são do tipo abertas (Figura 9b). A ligação dos enrolamentos segue o mesmo modelo das máquinas de indução [10].



**Figura 9 - (a) Ranhura do estator de baixa tensão, (b) Ranhura do estator de alta tensão**

#### 2.4.1.2 Rotor

O rotor é também formado de chapas laminadas justapostas que regra geral são do mesmo material que o estator. Do ponto de vista construtivo existem dois tipos básicos de rotores, rotores de polos salientes (Figura 10a) e rotores de polos lisos (Figura 10b). Esta diferenciação conduz a modelos equivalentes diferentes, mas não altera em nada o princípio de funcionamento, que permanece idêntico para ambos.

Rotores de polos lisos são em geral utilizados em turboalternadores, onde o número de polos é 2 ou 4, devendo-se ao facto de rotores com polos lisos serem mais robustos estando assim mais aptos a trabalharem em altas rotações (3600 e 1800 rpm).

Os geradores de polos salientes são em geral utilizados com um número de polos igual ou superior a 4. A escolha do número de polos é feita tendo em conta a rotação mais apropriada à máquina a que se destina. Turbinas hidráulicas, por exemplo, funcionam a baixa rotação, sendo por isso necessário geradores com elevado número de polos. Grupos geradores a gasóleo, por outro lado, utilizam geradores com um número de polos entre 4 e 8.

No caso de polos salientes o enrolamento de campo, também chamado de enrolamento de excitação, é alojado no espaço interpolar. No caso de polos lisos o enrolamento de campo é distribuído em ranhuras que geralmente cobrem apenas uma parte da superfície do rotor.

Além do enrolamento de campo, o rotor pode conter também um enrolamento semelhante ao do rotor da máquina de indução em gaiola. Este enrolamento é chamado de enrolamento amortecedor e é alojado em ranhuras semi-abertas e de formato redondo sobre a superfície do rotor. Conforme o nome sugere, este serve para amortecer oscilações que ocorrem em condições transitórias, como por exemplo uma retirada brusca de carga, alterações súbitas de tensão, ou variações de velocidade, este confere assim, uma maior estabilidade à máquina. Neste enrolamento só é induzida tensão quando ocorrem fenómenos transitórios na máquina. Em condições normais e em regime permanente não há nem tensão nem corrente induzida neste enrolamento, logo as suas dimensões são bastante reduzidas em relação ao enrolamento do estator e do rotor. No caso de motores síncronos este pode também funcionar como dispositivo de arranque, funcionando da mesma forma que o enrolamento em gaiola de esquilo dos motores de indução. O enrolamento neste caso chama-se enrolamento de arranque, o arranque do motor é chamado de arranque assíncrono e, regra geral, não há carga no eixo durante a partida.

Por não haver em regime permanente variações de fluxo em relação ao rotor, este pode ser construído de um material sólido, ao invés de lâminas. Assim, em algumas máquinas todo ou parte do rotor é construído de material sólido, a fim de aumentar a sua rigidez mecânica. Neste caso, a própria superfície do rotor funciona como enrolamento amortecedor, o que torna desnecessário um enrolamento amortecedor inserido nas ranhuras.

Independentemente da forma construtiva, os polos são alimentados com corrente contínua e criam o campo principal que induz tensão na armadura. A alimentação do enrolamento de excitação pode ser feita por meio de anéis e escovas, mas a maioria dos geradores de média e baixa potência, utilizam sistemas de excitação sem escovas, chamados de sistema de excitação *brushless*. Neste caso a excitação é fornecida por meio de excitatrizes auxiliares montadas no eixo da máquina e de dispositivos à base de semicondutores [10].

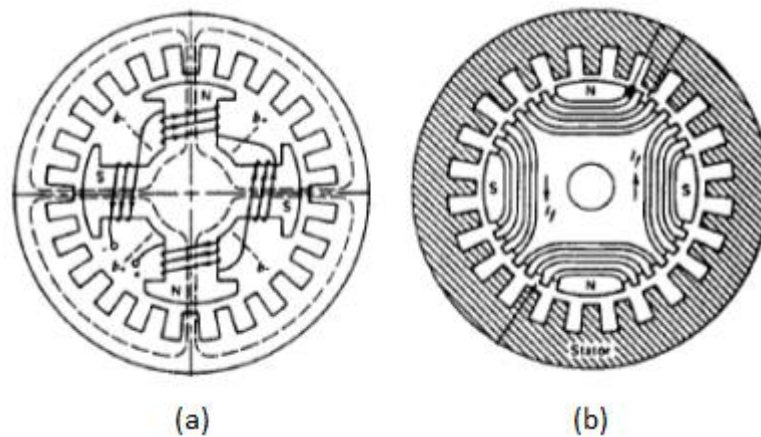


Figura 10 - Máquina de polos salientes (a) e polos lisos (b)

### 2.4.1.3 Conjunto Escovas e Anéis e Sistema Brushless

Os anéis e escovas constituem o processo mais vulgar de fazer a ligação elétrica com o rotor. Têm por função conectar a fonte de corrente contínua com os polos do rotor. Uma fonte de tensão contínua exterior é ligada ao enrolamento de excitação através dos anéis e escovas. A regulação da corrente de excitação pode ser feita variando o valor da tensão de alimentação ou através de resistências exteriores. Tratando-se de componentes que se desgastam e que podem produzir faíscas e interferência eletromagnética, assim, em alguns casos opta-se por utilizar geradores com excitação sem escovas, denominados geradores *brushless* (Figura 11).

O sistema *brushless* usa enrolamentos auxiliares que se deslocam num campo magnético. O movimento relativo destes enrolamentos em relação ao campo provoca uma f.e.m. induzida alternada. Por meio de retificadores esta tensão alternada é transformada numa tensão contínua e aplicada diretamente ao enrolamento de excitação. Estes retificadores estão colocados no rotor. Este sistema consegue impor

uma corrente de excitação no rotor controlável sem a utilização de anéis e escovas ou seja sem ligação galvânica do rotor ao exterior [10, 11].

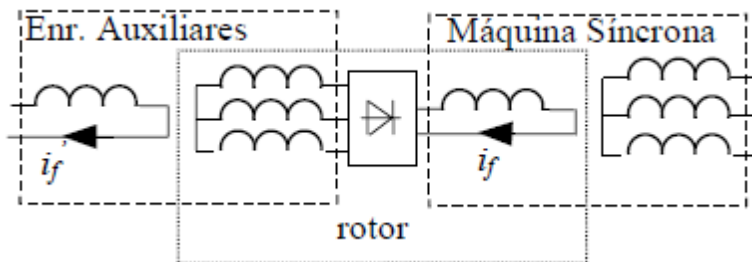


Figura 11 - Sistema de excitação sem anéis e escovas, sistema Brushless

## 2.4.2 Modelo da Máquina Síncrona

O esquema equivalente de uma máquina síncrona pode tomar a forma indicada na Figura 12.

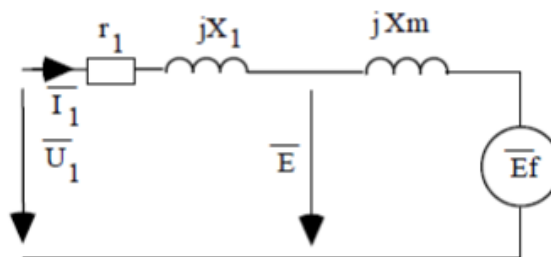


Figura 12 - Esquemas equivalentes da máquina síncrona

Nas aplicações mais relevantes a máquina síncrona funciona como gerador e por isso teremos mais em conta este modo de funcionamento. A diferença entre o esquema equivalente motor e o esquema equivalente gerador encontra-se ilustrada na Figura 13 [11]. Na mesma figura estão apenas representadas as resistências dos enrolamentos do estator.

O desprezo destas resistências é válido em máquinas de média e de grande potência quando se pretender calcular os valores das correntes. Para a determinação do rendimento é sempre necessário ter em conta as respetivas perdas.

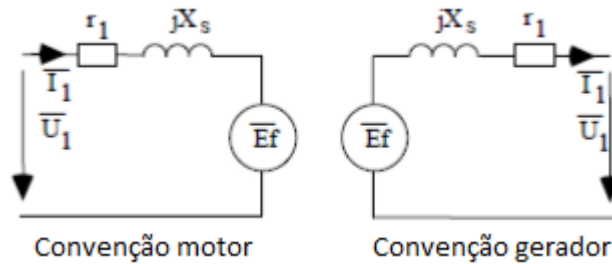


Figura 13 - Convenções utilizadas no estudo das máquinas síncronas

Sendo

$$X_s = X_m + x_1 \quad (6)$$

Em convenção motor, tem-se:

$$\bar{U} = (r_1 + jX_s)\bar{I} + \bar{E}_f \quad (7)$$

Em convenção gerador, tem-se:

$$\bar{E}_f = (r_1 + jX_s)\bar{I} + \bar{U} \quad (8)$$

Em funcionamento gerador, à equação vetorial 8 corresponde o diagrama vetorial da Figura 14. Neste diagrama estão representados os vetores espaço-tempo correspondentes às forças magnetomotrizes referentes ao induzido, ao indutor e à força magnetomotriz total.

O vetor espaço-tempo correspondente à força magnetomotriz provocada pelo indutor  $\bar{F}_{mf}$  está colocado em quadratura e avanço face ao vetor tempo  $\bar{E}_f$  correspondente à força eletromotriz provocada pelo mesmo enrolamento. A mesma relação (quadratura e avanço) existe entre os vetores  $\bar{F}_m$  e  $\bar{E}$  correspondentes à força magnetomotriz total e à força eletromotriz correspondente ao campo de indução magnética total. Esta força eletromotriz é designada por força eletromotriz de entreferro ou por força eletromotriz em carga.

O vetor espaço-tempo correspondente à força magnetomotriz provocada pela corrente do induzido encontra-se em fase com o vetor tempo correspondente à mesma corrente.

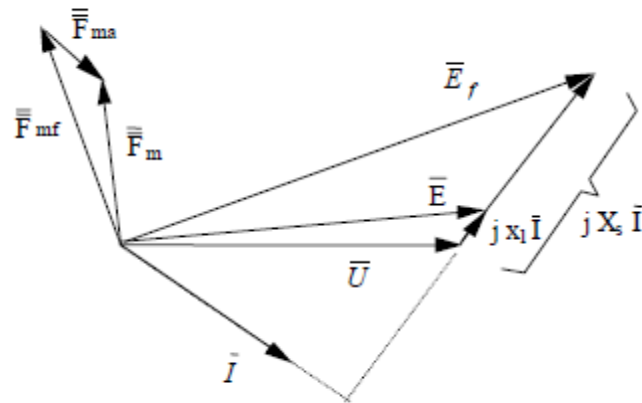


Figura 14 - Diagrama vetorial da máquina síncrona em regime não saturado

A colocação destes vetores está relacionada com as seguintes convenções:

- A localização da fase correspondente ao diagrama vetorial em jogo de tal forma que o ângulo  $\Delta$  do enrolamento é nulo.
- Na convenção da força magnetomotriz consideram-se positivos os polos norte.

Tabela 1 - Diferenças entre alternadores hidráulicos e turbo alternadores

	$\frac{r_1}{U}$	$\frac{X_s I}{U}$	$\frac{x_1 I}{U}$
Alternadores Hidráulicos	5%	70 a 180%	20%
Turbo Alternadores	2%	200 a 250%	25%

$\bar{E}_f$  é a força eletromotriz em vazio. A força eletromotriz  $\bar{E}$  está relacionada com o fluxo total no entreferro. As quedas de tensão  $r_1$ ,  $X_s \bar{I}$  e  $x_1 \bar{I}$  têm valores típicos apresentados na tabela.

## 2.4.3 Valores Nominais

Os principais valores nominais das máquinas síncronas são apresentados de seguida, sendo referentes ao funcionamento da máquina como gerador.

### 2.4.3.1 Tensão Nominal

É a tensão de funcionamento do enrolamento estator. Existem máquinas de baixa tensão (tensão inferior a 600 volts) e máquinas de alta tensão (tensão superior a 600 volts).

Quando a máquina funciona como gerador e não está ligada à rede, deve-se prover a máquina com um regulador de tensão, o qual atua na fonte de corrente contínua que alimenta os polos do rotor e tem por função manter a tensão no valor nominal.

### 2.4.3.2 Potência Nominal (Gerador)

É a potência aparente fornecida ao circuito elétrico aos terminais do gerador, dada pela seguinte equação:

$$S = V_l I_l \text{ (monofásico)} \quad (9)$$

$$S = \sqrt{3} V_l I_l \text{ (trifásico)} \quad (10)$$

A potência ativa fornecida pelo gerador depende da característica da carga, sendo dada pelas expressões:

$$P_e = V_l I_l \cos \varphi \text{ (monofásico)} \quad (11)$$

$$P_e = \sqrt{3} V_l I_l \cos \varphi \text{ (trifásico)} \quad (12)$$

$\cos(\varphi)$  - fator de potência do gerador (igual ao da carga quando o gerador trabalha isolado)

$I_l$  - corrente de linha

$V_l$  - tensão de linha

Considerando, por outro lado, que o gerador trabalhe conectado a um grande sistema de energia com tensão e frequência fixas, pode-se controlar a quantidade de energia reativa, e o fator de potência com que o gerador trabalha, controlando-se a corrente de excitação do mesmo.

Uma vantagem da máquina síncrona operando como motor é que o seu fator de potência pode ser ajustado por meio da corrente de excitação, permitindo que o motor trabalhe tanto com fatores de potência capacitivos como indutivos. O motor síncrono pode, assim fornecer energia reativa para a rede e também absorver energia reativa. Por essa característica ele é também utilizado para corrigir o fator de potência de instalações industriais.

### 2.4.3.3 Rendimento

O rendimento para a máquina funcionando como gerador é dado pela equação:

$$\eta = \frac{P_e}{P_m} \times 100 = \frac{(P_m - P_p)}{P_m} \times 100 \quad (\%) \quad (13)$$

$\eta$  - rendimento em percentagem (%)

$P_m$  - potência mecânica fornecida pela máquina primária no eixo (Watt)

$P_e$  - potência elétrica fornecida à carga ligada aos terminais (Watt)

$P_p$  - perdas (watt)

A curva de rendimento em função da carga é semelhante à curva para o motor de indução, sendo o rendimento muito próximo do nominal na faixa de 75% a 100% da potência nominal.

### 2.4.3.4 Frequência

A máquina síncrona gira sempre à velocidade síncrona (exceto em condições transitórias ou sob algum tipo de oscilação). A velocidade síncrona é definida pela rotação da máquina primária, a qual fornece a potência ativa para o sistema ligado ao gerador. A frequência da tensão gerada depende assim da velocidade de rotação e do número de polos, de acordo com a equação:

$$f = \frac{n_s p}{120} \quad (\text{Hz}) \quad (14)$$

$f$  - frequência (Hz) da tensão gerada.

$p$  - número de polos da máquina, determinado pela construção da máquina. Ele é escolhido em função da rotação da máquina primária.

$n_s$  - rotação da máquina primária (rpm).

## 2.5 Conclusões

Neste capítulo foi feita uma abordagem aos sistemas de trânsito de potência, incidindo particularmente no funcionamento da rede de transmissão, caracterizando a mesma e os equipamentos que a compõem. Foi efetuada uma introdução aos transformadores de potência, explicou-se em que consiste um banco trifásico de transformadores, quais os tipos de ligações mais comuns em transformadores de potência trifásicos e o que são autotransformadores.

Depois foi efetuada uma abordagem à máquina síncrona, descreveu-se as diversas partes que a compõem, apresentou-se o seu modelo equivalente e por fim fez-se referência aos valores nominais da mesma.



## Capítulo 3

### Subestações de Tração

Atualmente as subestações de tração elétrica nacionais que operam no sistema de 25 KV - 50Hz são alimentadas a tensões primárias entre 63 a 220 KV, com potências instaladas compreendidas entre 10 a 2x16,2 MVA.

Este sistema consiste na ligação do primário do transformador a duas fases da linha de alta tensão, e o secundário à catenária e ao carril, tendo assim uma tensão de alimentação de 25 kV ao longo de toda a linha entre a catenária e o carril.

Dentro da tensão de 25 kV entre catenária e carril, temos os sistemas de 1x25 kV e 2x25 kV, possuindo características distintas estes dois tipos de sistemas nomeadamente no que se refere ao custo de instalação, distância entre subestações entre outros.

Um dos principais problemas colocados pelas subestações de tração à rede fornecedora de energia é o desequilíbrio provocado pelas cargas monofásicas de tração à rede trifásica de alimentação.

À entrada das subestações de tração podemos ter dois tipos de alimentação. Alimentação bifásica (e.g. duas fases) e alimentação trifásica (e.g. três fases), sendo mais usual a alimentação bifásica [12, 13].

De uma forma simplificada as subestações de tração são constituídas por:

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

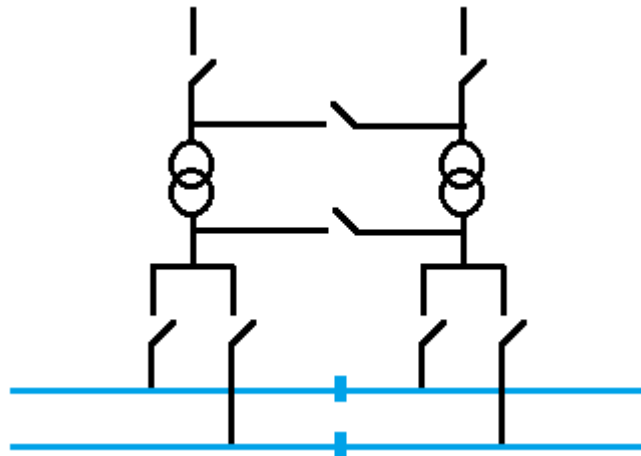


Figura 15 - Representação esquemática básica de uma subestação de tração

➤ Aparelhagem de Corte

A aparelhagem de corte, tanto do lado AT como do lado da catenária, consoante a topologia utilizada permite uma maior ou menor versatilidade de utilização da instalação, característica de extrema importância em termos de manutenção e exploração do sistema, proporcionando caminhos alternativos para o fluxo de energia desde a rede AT até à 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.

➤ Transformador de Potência

Os transformadores de potência são do tipo em banho de óleo possuindo regulação de tensão. A ventilação é na maior parte das vezes natural, embora em certos casos especiais se possa implementar uma ventilação do tipo forçado, com vista a reduzir a potência a instalar, alterando assim os regimes de sobrecarga da máquina.

➤ Equipamento de Proteção

Relativamente aos equipamentos de proteção figuram principalmente os sistemas de para-raios, os corta-circuitos fusíveis, os disjuntores BT e os relês de proteção associados aos disjuntores AT.

➤ Serviços Complementares

Como serviços complementares instalados no edifício de comando da subestação de tração, temos essencialmente os seguintes painéis:

- comando e de serviços auxiliares CA/CC;
- contagem;
- proteção;
- registo cronológico de acontecimentos;
- regulação automática de tensão;
- telemedida;
- bateria/carregador;
- autómato;
- interface com o sistema de telecomando.

## 3.1 Subestação 1x25kV - Ligação Bifásica e Ligação Trifásica ou em “V”

Atualmente é o sistema mais implementado na rede ferroviária nacional. Alimenta uma extensão de aproximadamente 1210 km de comprimento, existindo 18 subestações distanciadas entre si aproximadamente 60 km.

As subestações encontram-se separadas eletricamente por Zonas Neutras. Estas zonas neutras podem deixar de existir caso uma subestação seja colocada fora de serviço de maneira à catenária subjacente ser alimentada por uma outra subestação mais próxima [14, 15].

### 3.1.1 Ligação Bifásica

Considera-se uma Subestação alimentada a duas fases, ou bifásica, em que existem dois transformadores de potência alimentados pelas mesmas fases, funcionando um em carga e outro em reserva.

Neste tipo de ligação não é obrigatória a existência de uma zona neutra em frente à subestação para separação de fases, podendo a mesma existir para facilitar a exploração da rede [14, 15].

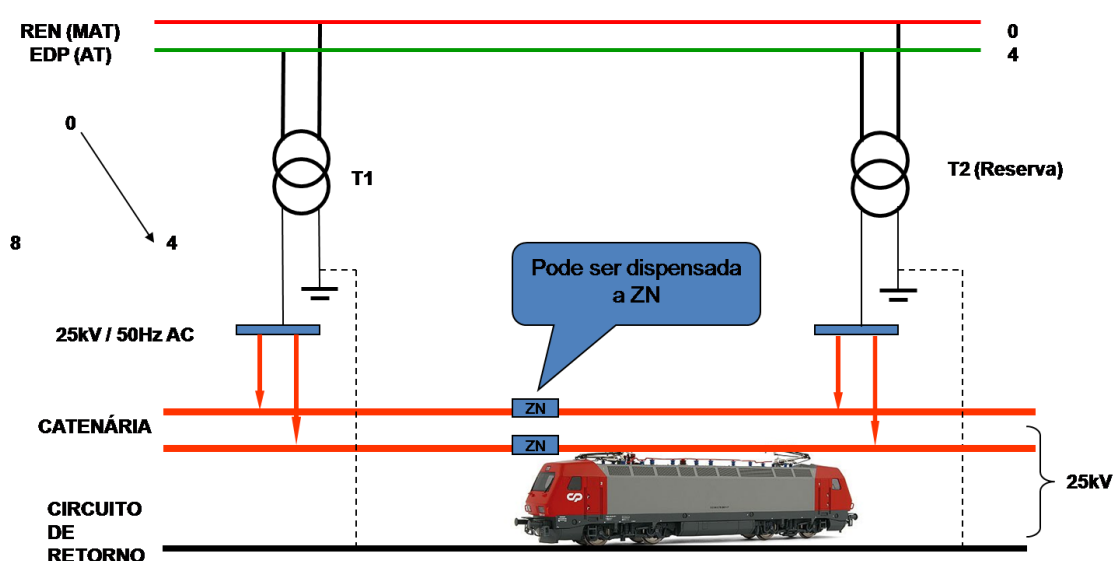


Figura 16 - Esquema subestação bifásica

### 3.1.2 Ligação Trifásica ou em “V”

As subestações trifásicas ou em “V” são constituídas por três transformadores de potência de 16,2 MVA cada, estando dois a funcionar numa ligação em “V” e o terceiro de reserva, podendo este substituir qualquer um dos outros dois. Neste tipo de ligação cada transformador é alimentado por duas fases. Obrigatoriamente uma das fases comum aos dois transformadores daí a designação em “V”. Cada transformador alimenta um sector da catenária e pode funcionar independente do outro estar ou não ao serviço. Este tipo de ligação tem como principal objetivo provocar um menor desequilíbrio na rede de transmissão.

O desfaseamento entre tensões secundárias é de  $60^\circ$ , o que equivale a uma diferença de potencial de 25 kV entre elas.

Numa ligação em “V” 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 franco [14, 15].

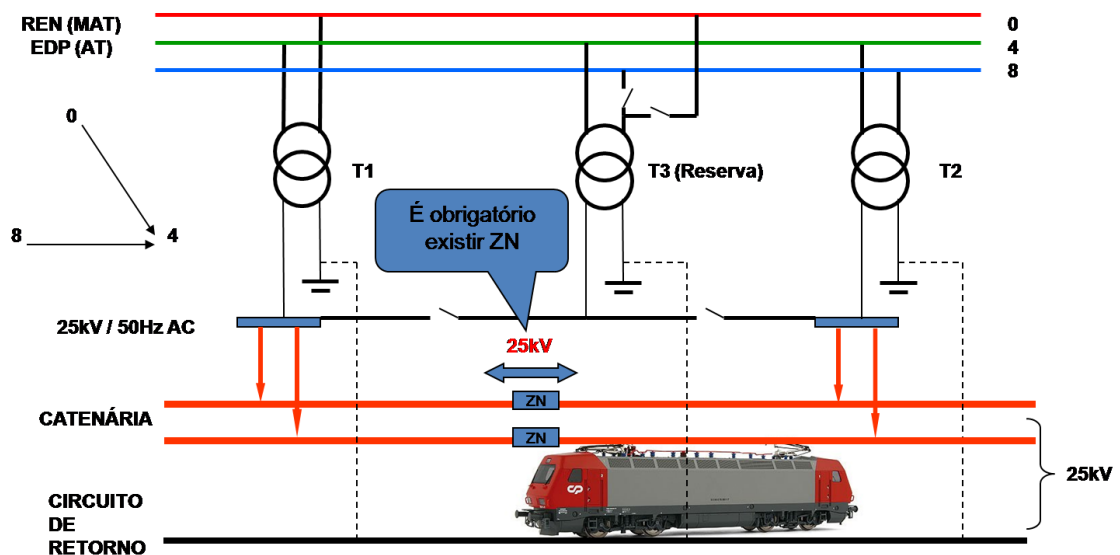


Figura 17 - Esquema da subestação trifásica com ligação em “V”

### 3.1.3 Zonas Neutras entre Subestações

A seguinte figura representa duas subestações bifásicas. Em cada uma delas existem dois transformadores de potência, alimentados por fases diferentes, a alimentar o seu sector de catenária.

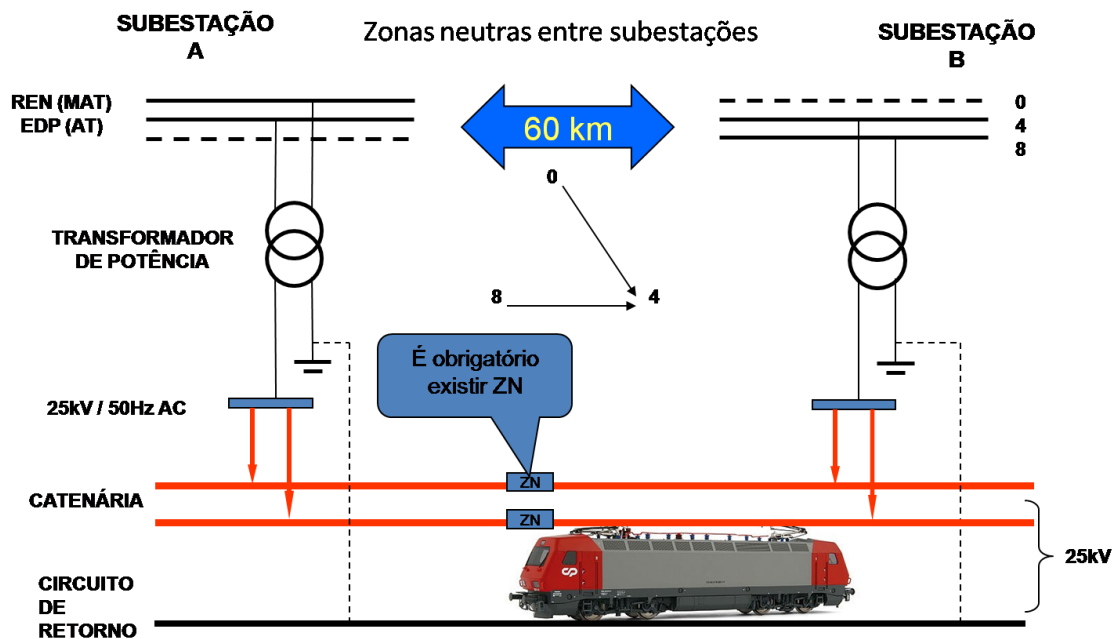


Figura 18 - Esquema das zonas neutras entre subestações

Neste exemplo é obrigatório existir uma zona neutra que separe as duas alimentações, pelo facto de as tensões aplicadas às catenárias não serem iguais. Esta zona neutra encontra-se sensivelmente a meio da distância entre as subestações. Caso exista a necessidade 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. Ainda assim 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 [14, 15].

### 3.1.4 Subestações 1x25 kV

No quadro a seguir podemos observar as subestações existentes em território nacional referentes à rede de tração em 1x25 kV [14, 15].

**Tabela 2 - 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
	V. F. Xira	Trifásica 63 kV	“ V “	32	1993	
	Entroncamento	Trifásica 63 kV	“ V “	20	1958	Remodelada em 2009
Norte	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	
	Fogueteiro	Bifásica 150 kV	Bifásica	20	1998	
	Monte Novo - Palma	Bifásica 150 kV	Bifásica	12	2002	
Sul	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	

## 3.2 Subestação 2x25kV - Ligação Bifásica + Autotransformadores

Este sistema é aplicado quando as fontes de fornecimento de energia da rede primária se encontram a grandes distâncias, pois necessitam de um menor número de subestações.

Atualmente o sistema de eletrificação da Linha da Beira Alta, do tipo 2x25 kV é o único existente em território nacional. Este sistema 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 [13, 14, 15].

**Tabela 3 - 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

À entrada de cada subestação temos duas linhas bifásicas em MAT a 220 kV 50Hz, possuindo cada subestação dois transformadores de potência de 16,2 MVA com relação 220/2x25 kV, em situação normal de exploração apenas se encontra um transformador ao serviço estando o outro de reserva.

Estes transformadores possuem ponto médio no enrolamento secundário, permitindo-nos assim obter duas tensões secundárias de 25 kV, cujos terminais são ligados, um à catenária e outro a um cabo alimentador designado de *feeder*. O ponto médio do transformador é ligado ao carril.

Toda a aparelhagem de corte no lado secundário existe em duplicado, quer para a catenária quer para o *feeder*. A ligação elétrica entre a catenária e o *feeder* é efetuada apenas através dos enrolamentos de autotransformadores colocados ao longo da linha, distando entre si cerca de 12 Km.

Este tipo de ligação 2x25 kV garante uma impedância de linha de cerca de 0,19 ohm/km, bastante inferior aos valores de impedância do sistema clássico que variam entre 0,5 ohm/km para via única e 0,3 ohm/km para via dupla. Este valor de impedância mais baixo permite que as quedas de tensão para a mesma potência de carga sejam menores e conseqüentemente permite um maior espaçamento entre as subestações de tração [14, 15].

Na figura seguinte está representado o princípio de funcionamento do sistema.

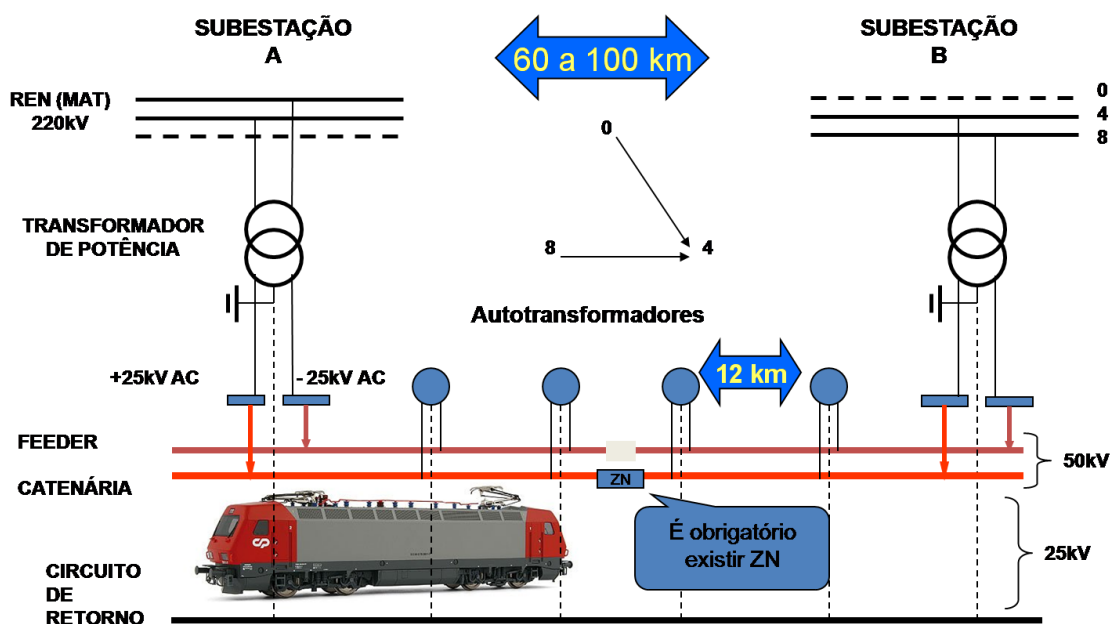


Figura 19 - Esquema alimentação 2x25 kV

### 3.3 Impactos da Subestação de Tração na Rede de Transmissão

Para obter uma tensão simples de 25 kV é necessário recorrer à transformação monofásica. Esta transformação produz um desequilíbrio nas linhas trifásicas de transmissão e para minimizar este desequilíbrio optou-se pela 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.

Ao optarmos por esta configuração teremos obrigatoriamente que estabelecer zonas neutras na catenária entre subestações, de modo a evitar o curto-circuito entre fases diferentes.

Neste tipo de instalações o desequilíbrio das linhas trifásicas 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% [16].

### 3.4 Conclusões

Neste capítulo abordou-se as subestações de tração caracterizando-as por tipo de alimentação: 1x25 kV e 2x25 kV. No caso das subestações 1x25 kV, explicou-se os tipos de alimentação que podem existir por parte da rede de transporte, podendo existir uma ligação bifásica à subestação ou trifásica também designada como ligação em “V”.

Para as subestações 2x25 kV explicou-se como é feita a alimentação por parte da rede de transporte. Sendo bifásica, mencionou-se como se opera este sistema e apresentou-se também as subestações existentes deste tipo em território nacional.

Por fim, identificou-se o que são zonas neutras e que importância têm nestes sistemas. Efetuou-se ainda feita uma pequena análise sobre os impactos destas subestações na rede de distribuição.

## Capítulo 4

### Alimentação da Catenária

Devido à elevada potência que necessitam as locomotivas de tração elétrica, é necessário encontrar um compromisso entre a máxima tensão possível de alimentar a catenária, e a tensão nominal das locomotivas, de modo a minimizar as perdas na catenária. A tensão adotada para redes de tração foi de 25 kV, com as configurações de 1x25 kV e 2x25 kV.

De um modo geral estes sistemas constam de:

- 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;
- 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.

Neste sistema temos duas opções de alimentação da catenária, 1x25 kV e 2x25 kV.

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 ao carril. A tensão que alimenta todas as cargas ao longo da catenária será de 25 kV, como se pode observar na Figura 20.

No outro sistema de alimentação de 2x25 kV o primário do transformador de potência da subestação de tração é também alimentado por duas fases da linha de transmissão, mas o enrolamento secundário tem uma saída intermédia, e necessita que a cada 10 a 15 km se instale um autotransformador, como podemos observar na Figura 21.

O sistema de 2x25 kV é constituído por um transformador de 50 kV com uma saída central, sendo ligado um extremo à catenária e o outro a um *feeder* auxiliar, denominado *feeder* negativo, o ponto intermédio é ligado ao carril.

Neste sistema são colocados autotransformadores segundo a catenária, espaçados entre eles de 10 a 15 km. A tensão aplicada à locomotiva ou locomotivas entre dois autotransformadores é de 25 kV, enquanto que a tensão situada fora deste espaço encontra-se a 50 kV, sendo assim percorrida por metade da intensidade e assim existindo metade da queda de tensão.

Pelo *feeder* circula uma corrente igual mas contrária à que circula na catenária, nos troços exteriores onde não se encontra a locomotiva, assim, os efeitos indutivos da corrente que circula na catenária e os da corrente que circula no *feeder*, anulam se mutuamente.

Do mesmo modo que se implementa um transformado de 50 kV com uma saída central, poderíamos utilizar um transformador de tensão triplo, diminuindo assim ainda mais as correntes na catenária e permitindo às subestações estarem mais distanciadas.

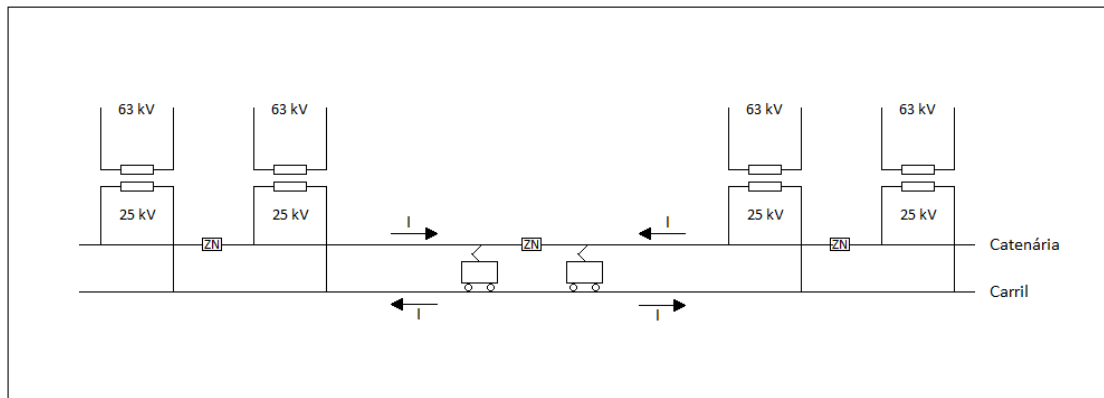


Figura 20 - Sistema de alimentação 1x25 kV

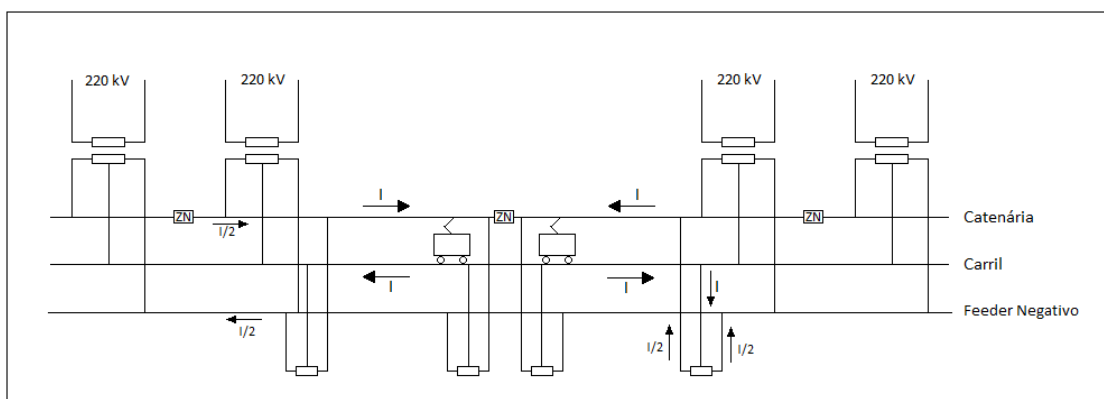


Figura 21 - Sistema de alimentação 2x25 kV

A Figura 20 e a Figura 21 representam o esquema de uma linha entre duas subestações de tração para um sistema de 1x25 kV e 2x25 kV. Estão indicadas as correntes que circulam pela catenária, pelo carril e pelo *feeder* [17].

De seguida descrevem-se melhor os dois sistemas de alimentação mencionados.

## 4.1 Alimentação 1x25 kV

Ao longo da linha férrea são instaladas subestações de tração separadas entre si cerca de 60 km. As subestações de tração dispõem de dois transformadores com uma potência máxima de 32 MVA, com entrada em alta tensão monofásica que podem ser conectados com diferentes fases da rede trifásica.

Neste sistema de alimentação o pantógrafo é alimentado diretamente pela catenária desde a subestação do troço de linha correspondente. Um segundo conjunto de condutores é colocado como circuito de retorno de modo a melhorar a qualidade do circuito elétrico [17].

Características principais do sistema:

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

## 4.2 Alimentação 2x25 kV

Ao longo da linha férrea são instaladas subestações, distas entre si cerca de 60 km. As subestações dispõem de dois transformadores, cada um deles com uma potência de 16,2 MVA, com alimentação de entrada de alta tensão de 220 kV e saída em 50 kV monofásico. Do lado do secundário do transformador temos uma saída central que é ligada ao carril de cada via. Uma das extremidades do secundário com tensão de 25 kV é ligada à catenária, e a outra com tensão de -25 kV é ligada ao *feeder* que existe ao longo da linha ferroviária.

No decorrer da linha, a cada cerca de 10 km, são instalados autotransformadores de 10 MVA, estando estes ligados à catenária e ao *feeder*, com ligação central ao carril.

Os autotransformadores asseguram a distribuição da corrente absorvida por a locomotiva, entre a catenária e o *feeder*. No entanto a locomotiva através do pantógrafo é alimentada a 25 kV, entre a catenária e o carril. Desta forma só uma parte da corrente absorvida pela locomotiva percorre todo o caminho entre esta e a subestação. Assim circula por o *feeder* uma corrente igual e contrária à que circula pela catenária nos troços entre autotransformadores onde não se encontra a locomotiva. Sendo assim os efeitos indutivos da corrente na catenária são anulados com os efeitos da corrente que circula no *feeder* [17].

A corrente absorvida pela locomotiva é distribuída da seguinte maneira.

- No trajeto entre a subestação e os autotransformadores, onde não se encontra a locomotiva, a corrente distribui se entre linha de alimentação e *feeder*, e a potência se transmite a uma tensão de 50 kV.
- No trajeto compreendido entre autotransformadores onde se encontra a locomotiva, efetua-se uma alimentação bilateral à locomotiva, sendo a corrente na catenária e no carril inferiores à corrente absorvida pela locomotiva.

Características principais deste sistema:

- Subestações alimentadas a AT de 220 kV
- Subestações a cada 60 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.

## 4.3 Conclusões

Neste capítulo começou-se por fazer uma introdução sobre a alimentação da catenária descrevendo sucintamente como é feita a alimenta de cada sistema, 1x25 kV e 2x25 kV, apresentando um esquema unifilar dos diferentes sistemas.

De seguida caracterizamos mais detalhadamente os dois sistemas, descrevendo como são constituídos e para que serve cada equipamento, descrevendo ainda as características principais dos sistemas, como por exemplo, o nível de tensão de alimentação em AT, espaçamento entre subestações, espaçamento entre autotransformadores, entre outras.

## Capítulo 5

### Retorno de Corrente da Tração

Os cabos aéreos de alimentação, ou catenária são apenas uma parte do circuito elétrico necessário para o sistema de tração Elétrica, sendo o retorno de corrente de tração à subestação outra parte imprescindível. Esta corrente pode atingir valores até 600 amperes em condições normais, e até 7500 amperes durante 100 milissegundos em condições de avaria / curto-circuito.

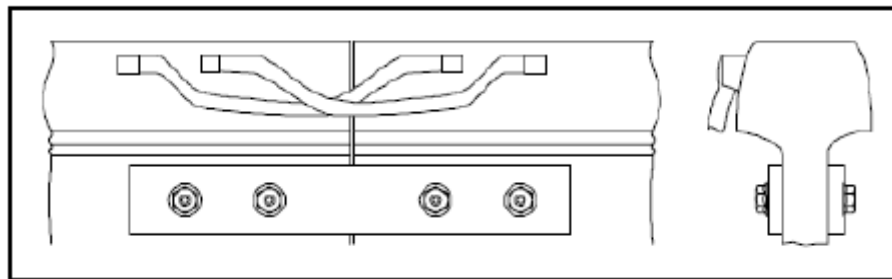
A corrente de retorno do sistema de tração é transmitida aos carris através das rodas da locomotiva, de seguida é conduzida pelo caminho com menor resistência, podendo ser partilhada entre os carris e os cabos ao longo da via (e.g. cabo de terra aéreo ou cabo de terra enterrado).

O sistema de retorno de corrente de tração (RCT) e terras de proteção (TP) tem como principal objetivo criar um ambiente seguro para seres humanos e sistemas elétricos na vizinhança da via-férrea, e assim salvaguardar o cumprimento das Normas Europeias (Ex. EN50121, EN50122-1 “Tensão de contacto Max=60V” e “Regime permanente 842V a 100ms”).

Para isso tem em consideração as seguintes especificações:

- 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-férrea 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.

O sistema de retorno de tração deve ser eletricamente contínuo e caso ocorra uma 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 dos cabos se partir. A continuidade elétrica do carril está representada na Figura 22 [15, 18, 19].



**Figura 22 - Ligação redundante do carril**

Atualmente em território nacional existem três sistemas de retorno de corrente de tração a 25 kV:

- Sistema Tradicional (ST)
- Sistema com condutor de retorno (RT)
- Sistema com Autotransformadores (AT)

## 5.1 Sistema Standard

O sistema *Standard* (Sistema ST) é o sistema mais simples e económico de retorno de corrente de tração e baseia-se apenas na utilização dos carris para a condução dessa mesma corrente. De seguida podemos ver uma representação deste sistema.

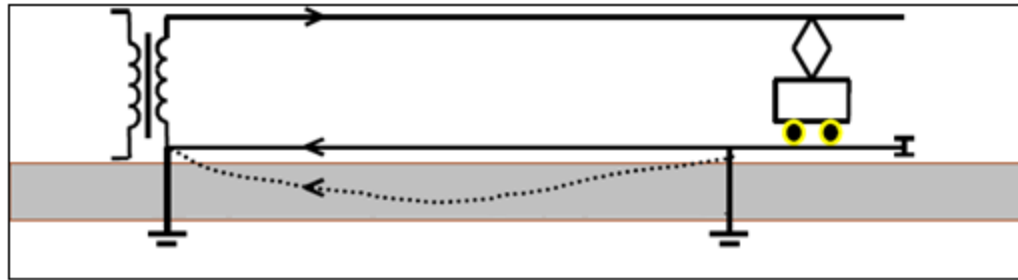


Figura 23 - Sistema standard

Este sistema apresenta algumas desvantagens. Uma delas é 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 a locomotiva (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 [15, 19].

Na figura seguinte encontra-se representada a distribuição do campo magnético no sistema *standard*.

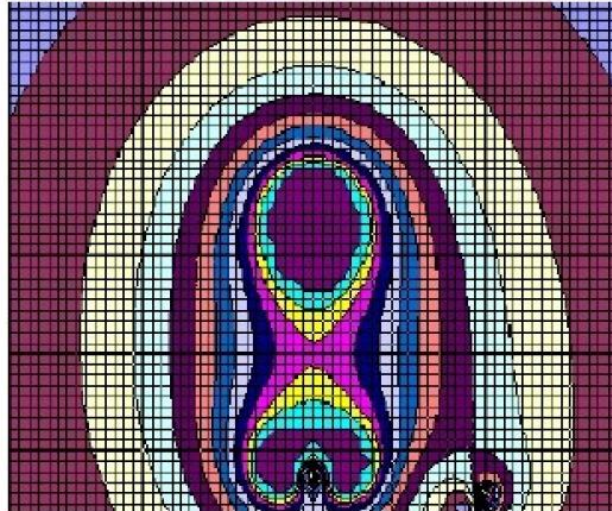


Figura 24 - Distribuição do campo magnético no sistema standard

## 5.2 Sistema com Condutor de Retorno

O sistema com condutor de retorno (Sistema RT) tem como base o 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 podemos ver representado na figura seguinte.

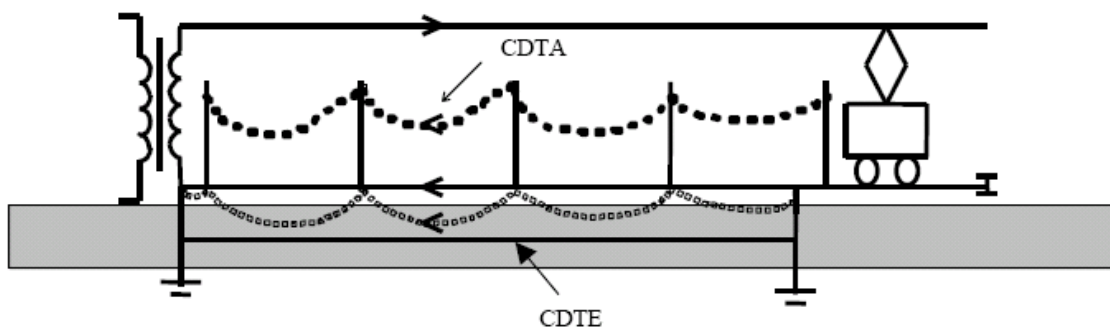


Figura 25 - Sistema com condutores de retorno

O cabo de terra aéreo (CDTA) é eletricamente contínuo ao longo de toda a via e é ligado ao poste de catenária através de uma pinça colocada na parte exterior deste em relação à via.

Comparativamente com o sistema *standard* este sistema permite a diminuição da impedância do sistema através da colocação do cabo de terra aéreo (CDTA) na proximidade da catenária, o acoplamento magnético mútuo entre o CDTA e a catenária reduz assim as interferências com os sistemas vizinhos.

Com este sistema teremos cerca de 20% da corrente de retorno a circular no CDTA reduzindo assim a quantidade de corrente que circula no solo, resultando num campo magnético menor comparativamente com o sistema *standard* [15, 19].

Na figura seguinte encontra-se representada a distribuição do campo magnético no sistema com condutor de retorno.

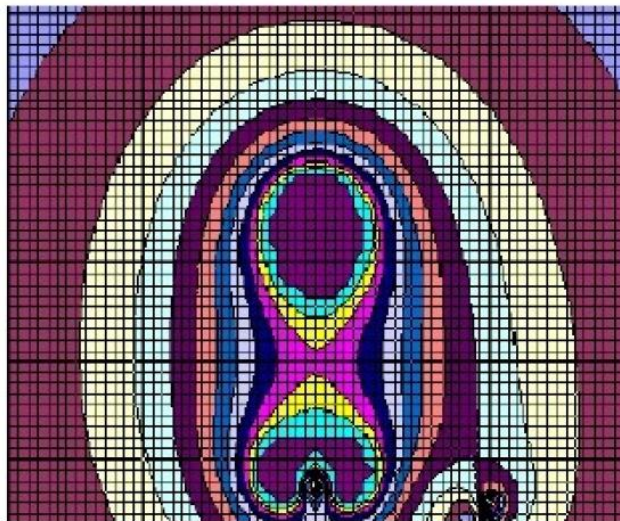


Figura 26 - Distribuição do campo magnético no sistema com condutor de retorno

### 5.3 Sistema Autotransformador

O sistema Autotransformador (Sistema AT) é utilizado para fornecimento e distribuição quando os valores de potência e distâncias são elevados. A subestação alimenta a catenária (fio de contacto + cabo de suporte) a uma tensão de +25 KV e simultaneamente, alimenta os postos Autotransformadores através do *feeder* a uma tensão -25 kV, ver Figura 27.

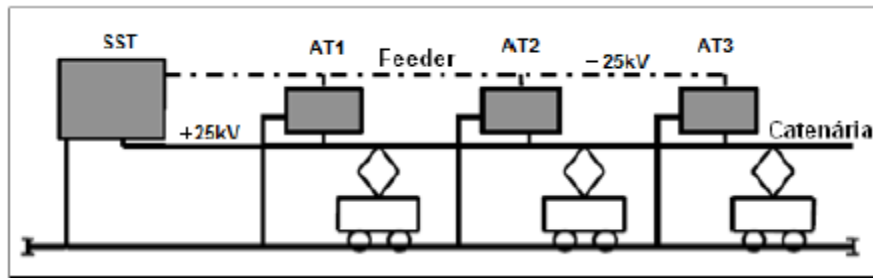


Figura 27 - Sistema autotransformador

No sistema AT temos a alimentação da carga a 25 KV e o transporte de energia entre a subestação e os Autotransformadores a uma tensão de 50 KV.

Assim quando a locomotiva ocupa uma secção situada entre dois Auto Transformadores, conforme se representa na Figura 27, 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*, tornando a corrente de tração que circula nos carris e no solo mínima [15, 19].

Na figura seguinte encontra-se representada a distribuição do campo magnético no sistema auto transformador.

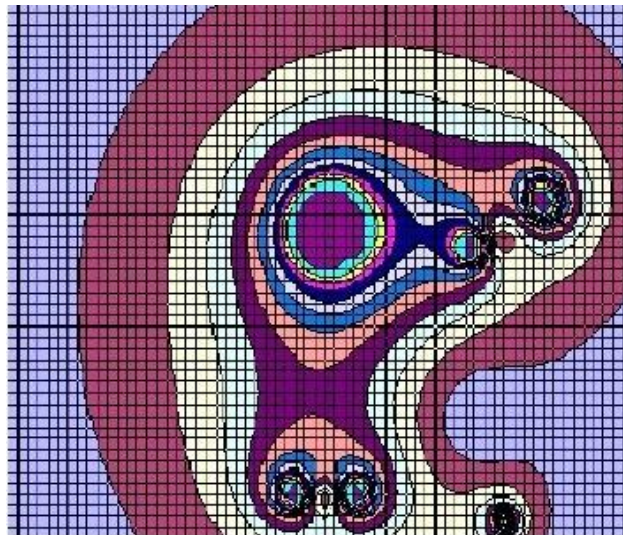


Figura 28 - Distribuição do campo magnético no sistema autotransformador

## 5.4 Comparação entre Sistemas de Retorno

Na Figura 29 temos uma comparação gráfica entre os sistemas de retorno de corrente de tração no que se refere ao campo magnético emitido pelos vários sistemas [15].

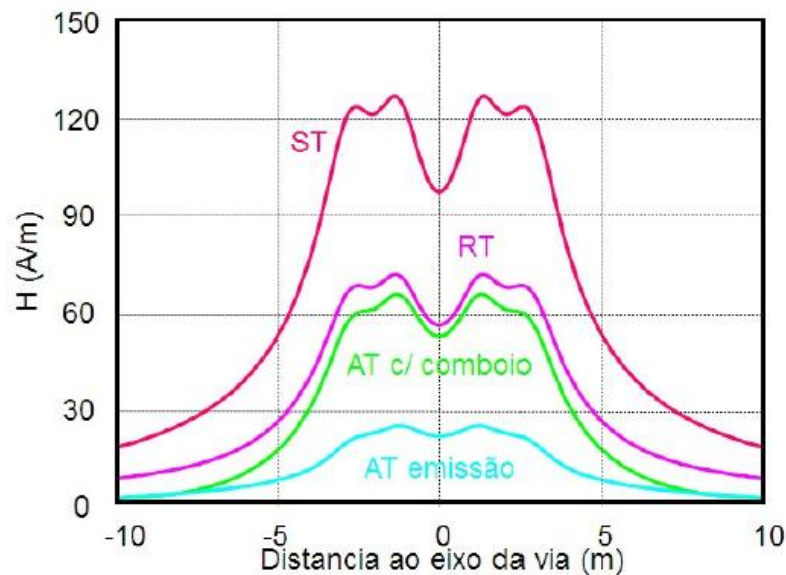


Figura 29 - Comparação entre sistemas de retorno

## 5.5 Tipos de Conexões do Sistema de Ligação à Terra

Os condutores de retorno de corrente de tração como CDTE e 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 4 - 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 4 indica alguns exemplos de distâncias entre ligações transversais, de modo 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 devemos reduzir as distâncias entre as ligações transversais ao mesmo tempo que aumentamos 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.

A ligação de terra dos carris pode ser efetuada de três formas, dependendo do sistema de deteção de comboios utilizado. São elas:

- 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 [19].

### **5.5.1 LTI - Ligação Transversal Integral (Via Única)**

De entre as múltiplas possibilidades de localização das LTI's, existem algumas posições impostas para as mesmas: [15, 19]

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

### **5.5.2 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 [15, 19].

Assim sendo as LEAE 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.

## 5.6 Manutenção do Sistema de Retorno da Corrente de Tração, Terras e Proteção

A manutenção de um sistema de retorno de corrente de tração consiste essencialmente na verificação da continuidade elétrica dos cabos de terra aéreo e enterrado e dos carris. Sendo uma boa terra para este sistema, uma terra inferior a um ohm, não sendo possível o seu licenciamento caso isto não se verifique.

Para a verificação da continuidade do CDTA a inspeção é bastante simples, sendo apenas visual. Ao 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. Para este distinguem-se dois tipos de inspeção, a inspeção visual das conexões de terra nas caixas de inspeção e a verificação da continuidade do cabo de terra enterrado.

As inspeções das conexões de terra nas caixas de inspeção devem ser realizadas com uma periodicidade máxima de 5 anos e devem ser verificadas as conexões à barra de terra das caixas de inspeção e o binário de aperto das porcas.

Já a verificação da continuidade do CDTE é testada com a injeção de uma corrente contínua no CDTE, estando este isolado de todas as outras secções de CDTE. Este ensaio é realizado secção a secção, para deste modo em caso de falha ser possível localizar a secção onde ocorreu a descontinuidade do CDTE. Para aja suspeitas de descontinuidade elétrica deve-se proceder à medição da tensão de contacto [19].

## 5.7 Conclusões

Neste capítulo abordou-se o sistema de retorno de corrente de tração e terras de proteção cujo principal objetivo é criar um ambiente seguro para seres humanos e sistemas elétricos existentes na vizinhança da via-férrea. Em seguida foram descritas as considerações e especificações a ter em conta para que isto aconteça.

Foi também efetuada a descrição dos diversos sistemas de retorno, apresentado um gráfico da distribuição do campo magnético para cada um deles e foi feita uma comparação entre os diversos sistemas. Abordou-se ainda dois tipos de conexões do sistema de ligação à terra, descrevendo onde é obrigatório a utilização de cada tipo de conexão.

Por último descreveu-se como é feita a manutenção do sistema de retorno e de proteção.



## Capítulo 6

### Simulação do Impacto na Rede do Sistema de Tração Elétrica

Para análise do impacto na rede de transmissão do sistema de tração elétrica iremos utilizar a ferramenta de cálculo matemático MATLAB<sup>TM</sup>/Simulink, para isso iremos modelizar um trecho da rede de transporte ligada a uma subestação de tração a alimentar uma ou mais locomotivas. Iremos realizar simulações para o sistema 1x25 kV e para 2x25 kV.

## 6.1 Configuração da Rede

Consideramos a seguinte rede para simulação.

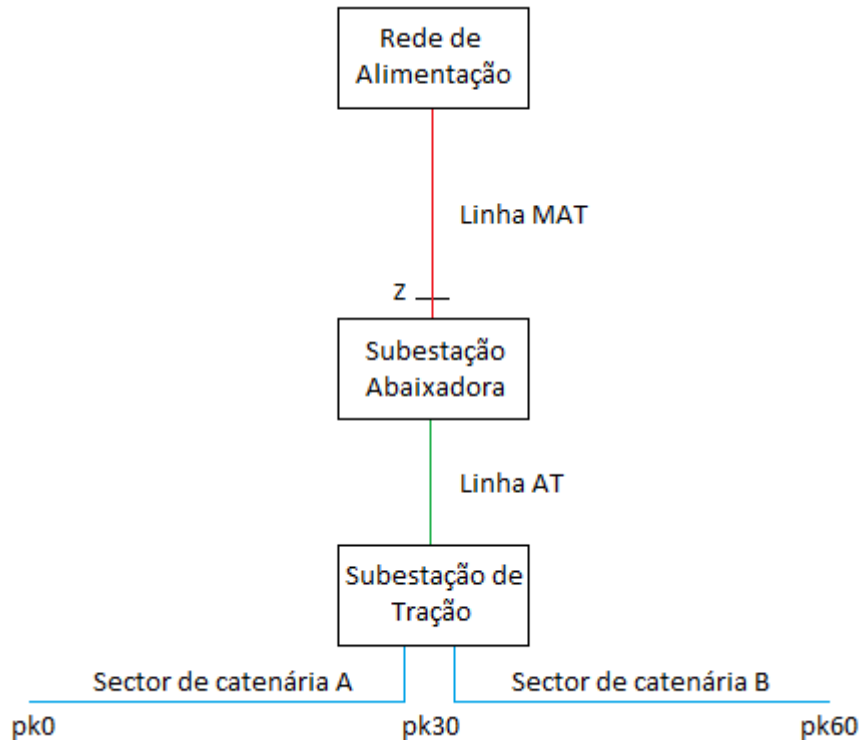


Figura 30 - Rede simulada

Visto este trabalho se centrar na análise dos impactos na rede de transmissão, iremos analisar os impactos na mesma através do ponto "Z" da rede, indicado na Figura 30, sendo considerado dois troços de catenária com 30 km cada (e.g. catenária A de pk0 (ponto quilometro 0) a pk30 (ponto quilometro 30) e catenária B de pk30 a pk60). Outros pontos poderão ser referidos ao longo do trabalho caso se venha a mostrar relevante para este estudo. Os elementos constituintes da rede são caracterizados de seguida.

### 6.1.1 Rede de Alimentação

Considera-se que à saída da subestação de alimentação MAT, a rede de alimentação é caracterizada pela seguinte potência de curto-circuito a montante:

$$S_{cc3F} = 2500 \text{ MVA}$$

$$S_{ccFF} = 2100 \text{ MVA}$$

$$S_{ccFT} = 1800 \text{ MVA}$$

$$V_n = 400 \text{ kV}$$

### 6.1.2 Linha de Alimentação MAT

Considera-se uma linha trifásica de 400 kV equilibrada com 100 km de comprimento caracterizada da seguinte forma:

$$R_L = 0,0345 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$X_L = 0,3116 \text{ H/km}$$

$$B_L = 9,2772 \text{ F/km}$$

### 6.1.3 Subestação Abaixadora

As características do(s) transformador(es) de potência da subestação são as seguintes:

$$V_{n1} = 400 \text{ kV}$$

$$V_{n2} = 63 \text{ kV}$$

$$S_n = 30 \text{ MVA}$$

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

$$R/X = 0,15$$

### 6.1.4 Linha AT

Foi considerada uma linha trifásica de 63 kV equilibrada com 10 km de comprimento para a simulação a 1x25 kV caracterizada da seguinte forma:

$$R_L = 0,1529 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$X_L = 0,7869 \text{ H/km}$$

$$B_L = 0,0726 \text{ F/km}$$

Sendo que para a simulação a 2x25 kV consideramos uma linha trifásica de 220 kV equilibrada com 10 km de comprimento caracterizada da seguinte forma:

$$R_L = 0,0771 \Omega/\text{km}$$

$$X_L = 0,4194 \text{ H}/\text{km}$$

$$B_L = 0,6442 \text{ F}/\text{km}$$

## 6.1.5 Subestação de Tração

Neste trabalho vamos considerar dois tipos de alimentação de locomotivas, podemos ver as características das diferentes subestações de seguida.

### 6.1.5.1 Subestações de Tração 1x25kV

As características do(s) transformador(es) de potência da subestação são as seguintes:

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

$$V_{n2} = 26,5 \text{ kV}$$

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

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

$$R/X = 0,15$$

Foi considerada uma subestação com alimentação trifásica de ligação em "V", encontrando-se a subestação instalada no ponto quilómetro (pk) 30 da linha.

### 6.1.5.2 Subestações de Tração 2x25kV

As características do(s) transformador(es) de potência da subestação são as seguintes:

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

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

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

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

$$R/X = 0,15$$

Foi considerada uma subestação com alimentação bifásica, sendo que estes transformadores possuem um ponto médio no enrolamento secundário ligado ao

neutro e uma tensão nominal em vazio entre polos (catenária e *feeder*) de 53 kV (2x26,5 kV). A tensão entre cada um dos polos e o neutro é 26,5 kV.

Admite-se que a subestação de tração se encontra instalada no ponto quilómetro (pk) 30 da linha.

## 6.1.6 Catenárias

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

### 6.1.6.1 Catenária 1x25 kV

As características da catenária 1x25 kV são as seguintes

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

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

### 6.1.6.2 Catenária 2x25 kV

As características da catenária 1x25 kV são as seguintes

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

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

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

## 6.1.7 Autotransformadores

Apenas no sistema 2x25 kV são utilizados autotransformadores. A distância entre autotransformadores e estes e a subestação são 10 km. Nos 60 km de linha encontram-se seis autotransformadores (AT1 - pk 0, AT2 - pk 10, AT3 - pk 20, AT4 - pk 40, AT5 - pk 50, AT6 - pk 60). Apresentando as seguintes características cada um deles:

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

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

$$R/X = 0,15$$

## 6.2 Configuração da Locomotiva

De seguida podemos ver alguns dados importantes sobre uma locomotiva. Estes dados foram fornecidos pela REFER. A tabela completa pode ser vista no Anexo 2.

Tabela 5 - 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

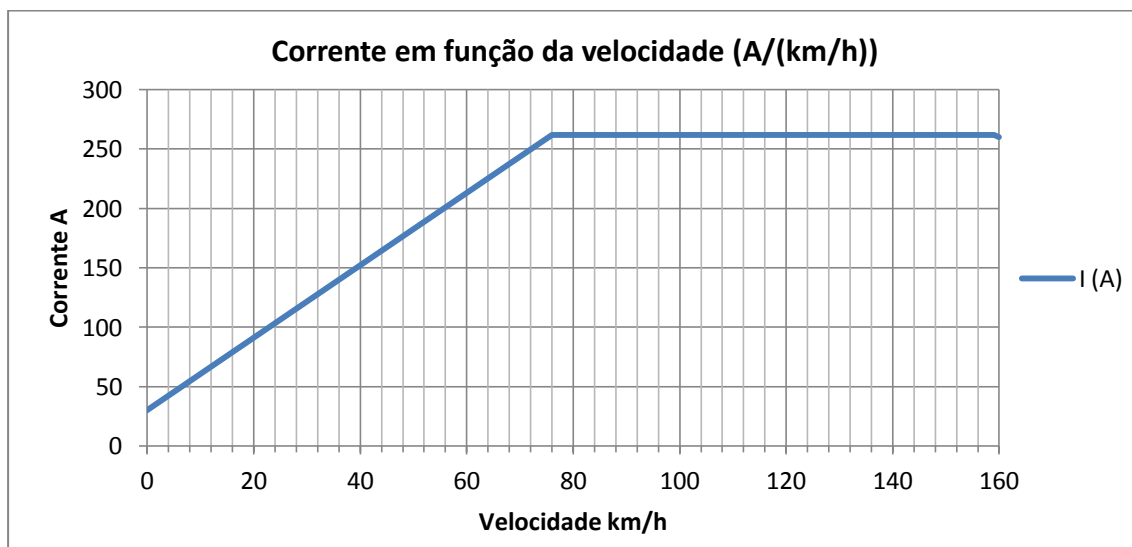


Figura 31 - Corrente elétrica consumida em função da velocidade

## 6.3 Sistema 1x25 kV

Com o objetivo de analisar e comparar o impacto dos sistemas de tração elétrica, foi neste capítulo considerada uma alimentação do sistema a 1x25 kV, onde as subestações de tração se encontram com alimentação trifásica com ligação em "V", onde a fase comum é a L2, sendo considerados diversos cenários de simulação onde posteriormente é feita uma análise crítica dos impactos encontrados na rede de transporte.

Podemos observar de seguida os critérios considerados para os cenários de simulação.

### ➤ Cenário 1

Carga móvel de potência constante.

O objetivo deste cenário é a verificação do comportamento da rede de transporte no que respeita a desequilíbrios de tensões, correntes e eventuais perturbações harmónicas na rede.

### ➤ Cenário 2

Carga fixa de potência constante.

O objetivo deste cenário é a comparação com o cenário 1, onde poderemos verificar se a consideração de uma carga móvel ao invés de uma carga fixa na simulação trará alterações significativas na rede de transporte.

### ➤ Cenário 3

Duas cargas móveis de potência constante em diferentes troços da catenária.

O objetivo deste cenário é a verificação do comportamento da rede de transporte no que respeita a desequilíbrios de tensões, correntes e eventuais perturbações harmónicas na rede.

### ➤ Cenário 4

Carga móvel de potência constante a atravessar uma zona neutra.

O objetivo deste cenário é a verificação do comportamento da rede de transporte no que respeita a desequilíbrios de tensões, correntes e eventuais perturbações harmónicas na rede.

De seguida podemos verificar o gráfico de tensões e correntes na rede de transporte para o sistema em vazio, ou seja sem nenhuma locomotiva em funcionamento, o qual servirá de base para comparação com os diferentes cenários.

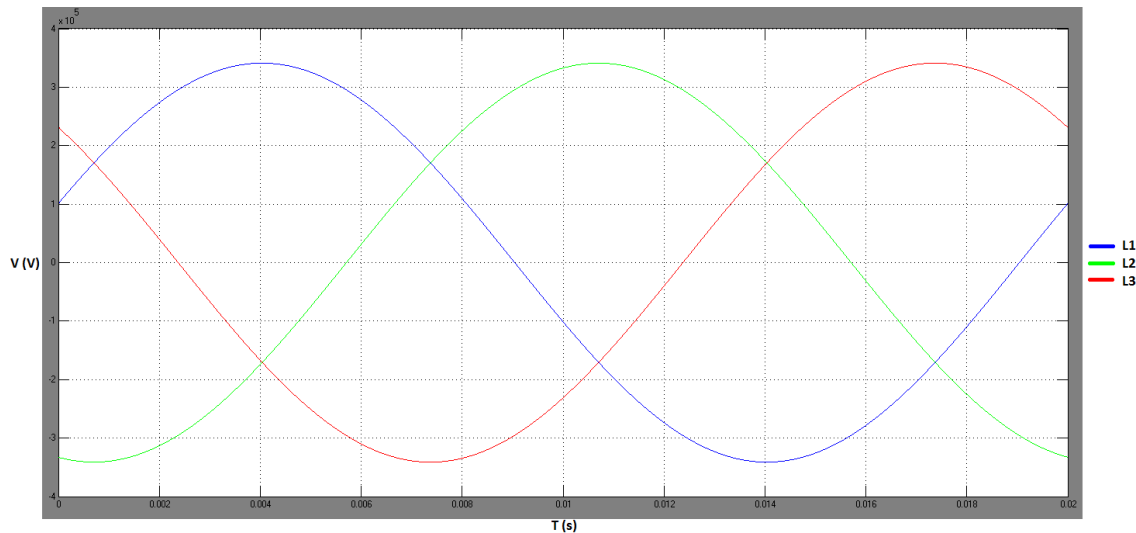


Figura 32 - Tensão da rede em vazio

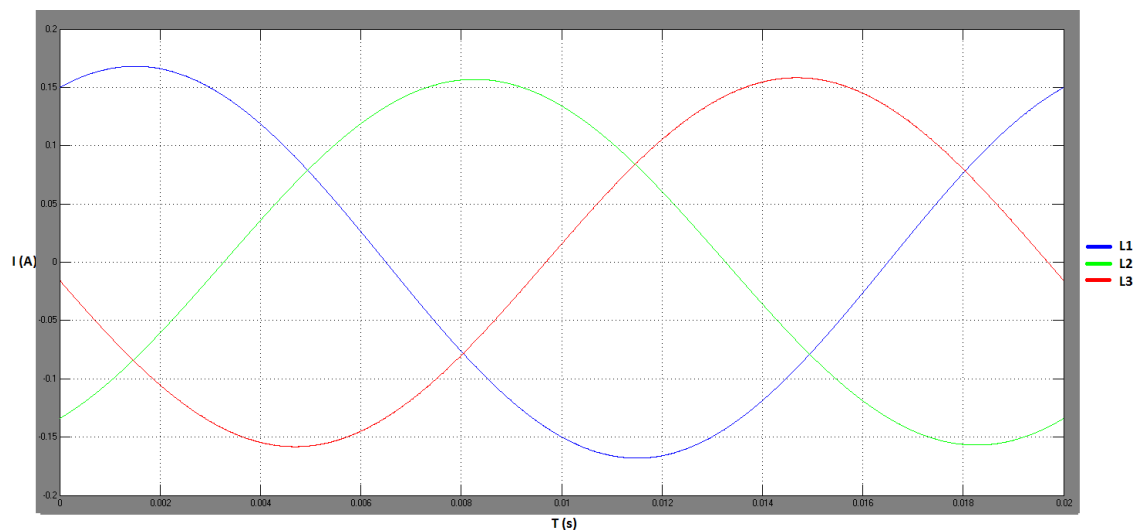


Figura 33 - Corrente na rede em vazio

Relativamente ao gráfico das tensões, podemos verificar que as mesmas se encontram equilibradas e com o mesmo valor de pico, não existindo assim perturbações nas tensões da rede quando o sistema 1x25 kV se encontra em vazio.

Já o gráfico das correntes apresenta um ligeiro desfasamento relativamente ao gráfico das tensões, estando o gráfico das correntes em avanço em relação ao das

tensões. Isto verifica-se devido ao facto de em vazio a linha de transmissão possuir uma característica capacitiva, explicando assim este ligeiro desfasamento de 45°. A característica capacitiva das linhas assim como as perdas na rede explicam os valores de amplitude de corrente.

Podemos verificar também que a corrente L1 é ligeiramente superior às restantes, mas não de forma significativa, uma vez que as correntes são bastante reduzidas.

### 6.3.1 Cenário 1

Neste cenário foi simulada uma locomotiva em movimento com uma velocidade constante de 80 km/h, a deslocar-se no sector de catenária "A". Foram retirados os seguintes gráficos de tensões e correntes no ponto "Z" da rede, como indicado na Figura 30.

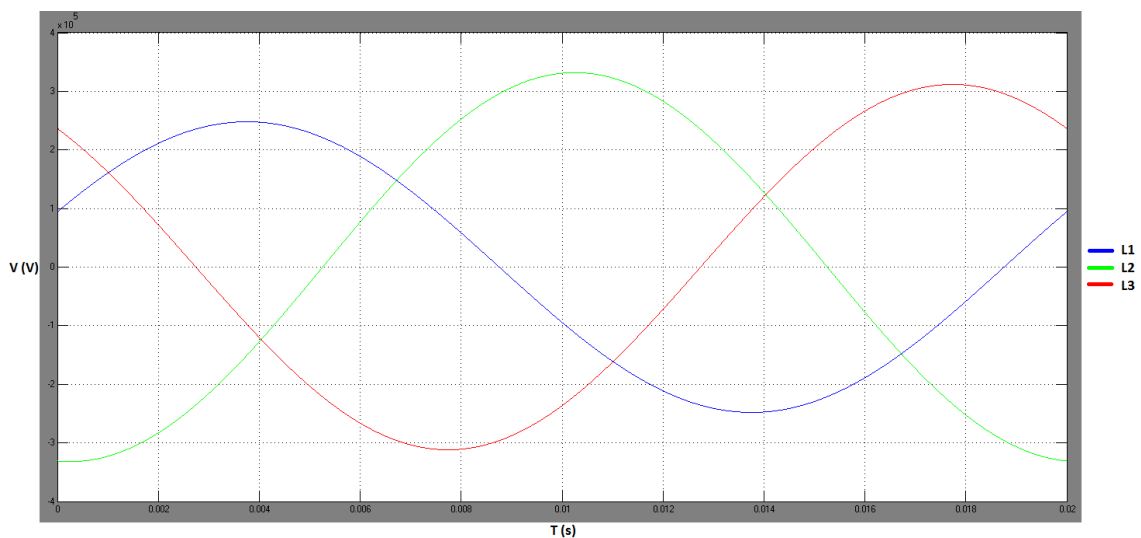
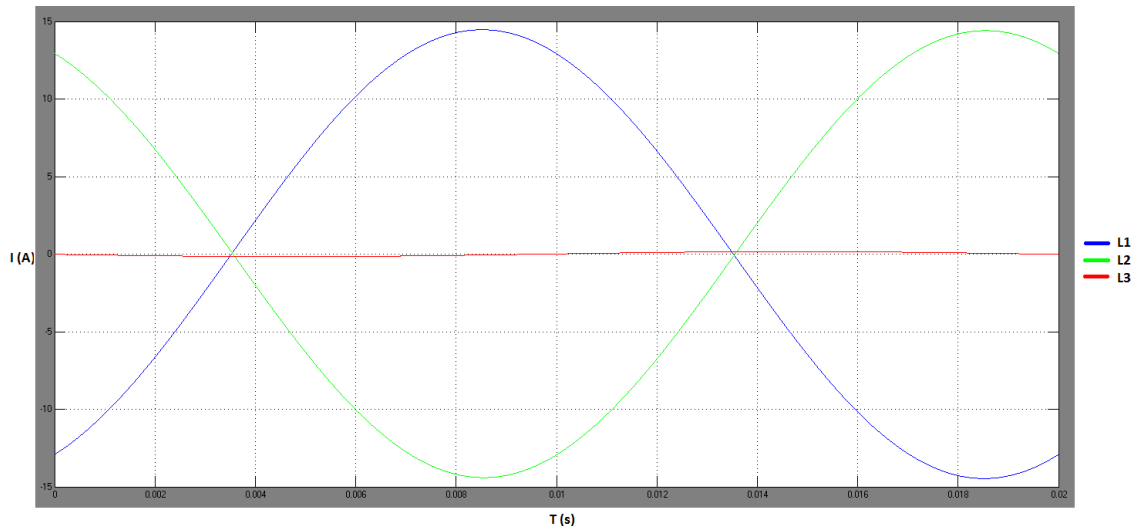


Figura 34 - Tensão da rede cenário 1



**Figura 35 - Corrente na rede cenário 1**

Como podemos observar com apenas uma locomotiva em movimento já se verificam perturbações na rede no que se refere às tensões.

Em relação às correntes na rede podemos observar que a corrente na fase L3 é praticamente nula, sendo isto facilmente explicado pelo facto de o sector de catenária "A" ser alimentado pelas fases L1 e L2.

Verificamos um desfasamento entre as correntes L1 e L2 de praticamente 180°, mais 60° que o desfasamento "normal". O desfasamento "normal", como podemos ver na simulação em vazio, é de 120°. Este desfasamento pode ser explicado por a rede se encontrar a alimentar uma carga através de um transformador que está a ser bialimentado por as fases L1 e L2, "criando" o transformador um efeito de oposição nestas mesmas fases.

A carga é praticamente indutiva daí o desfasamento das correntes relativamente às tensões, estando as correntes em atraso. Sendo este atraso de cerca 85° para a corrente L1 e de 145° para a corrente L2.

### 6.3.2 Cenário 2

Neste cenário foi simulada uma carga estacionária, com uma potência constante igual à de uma locomotiva à velocidade constante de 80 km/h, que se encontra no ponto quilómetro (pk) 20 no sector de catenária "A", onde foram depois retirados os seguintes gráficos de tensões e correntes no ponto "Z" da rede, como indicado na Figura 30.

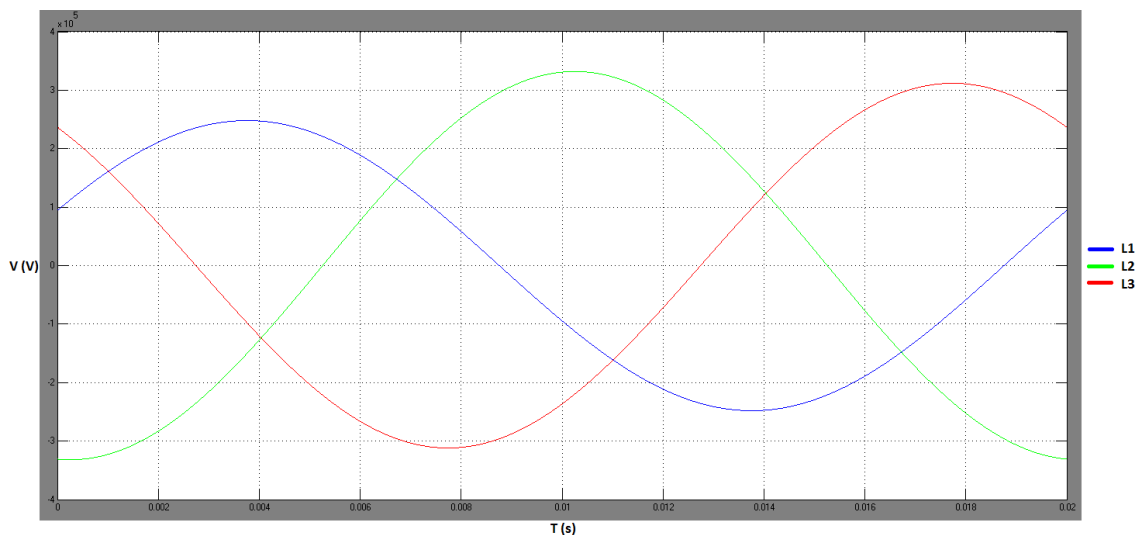


Figura 36 - Tensão da rede cenário 2

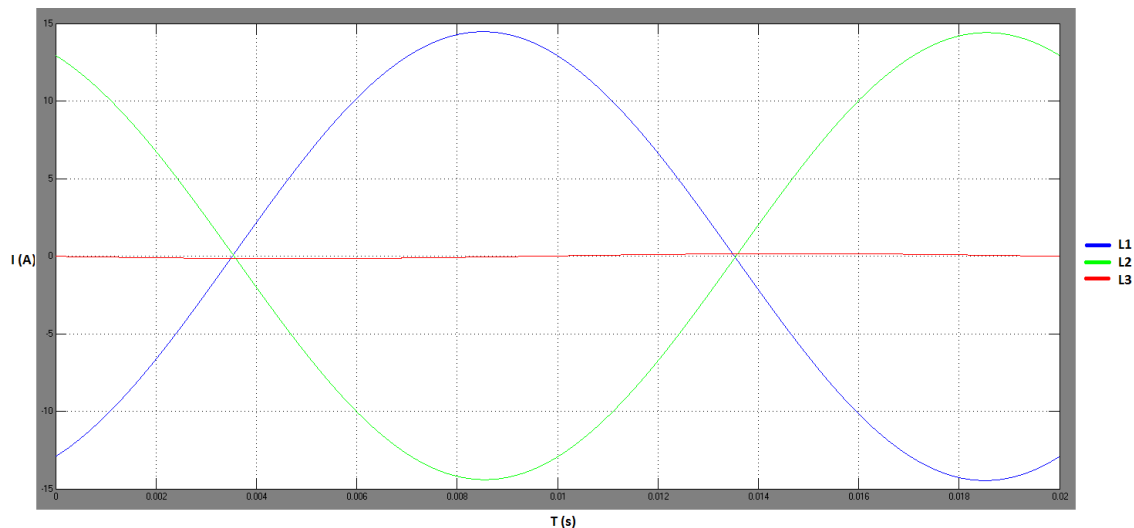


Figura 37 - Corrente na rede cenário 2

Comparativamente com o cenário 1 não existe qualquer diferença significativa nos gráficos obtidos, tanto no gráfico de tensões como no gráfico de correntes. O facto de considerarmos uma carga fixa ou uma carga móvel que se desloca ao longo

da catenária só trará alterações significativas para uma análise a jusante da subestação de tração, onde as alterações da impedância da linha em função do tempo serão mais notórias.

No nosso caso onde pretendemos verificar os impactos na rede de transmissão a alteração da impedância da linha trará apenas diferenças mínimas no gráfico de correntes.

### 6.3.3 Cenário 3

Neste cenário, foi efetuada a simulação de duas locomotivas em movimento com uma velocidade constante de 80 km/h, que se deslocam uma no sector de catenária "A" e outra no sector de catenária "B", onde foram depois retirados os seguintes gráficos de tensões e correntes no ponto "Z" da rede, como indicado na Figura 30.

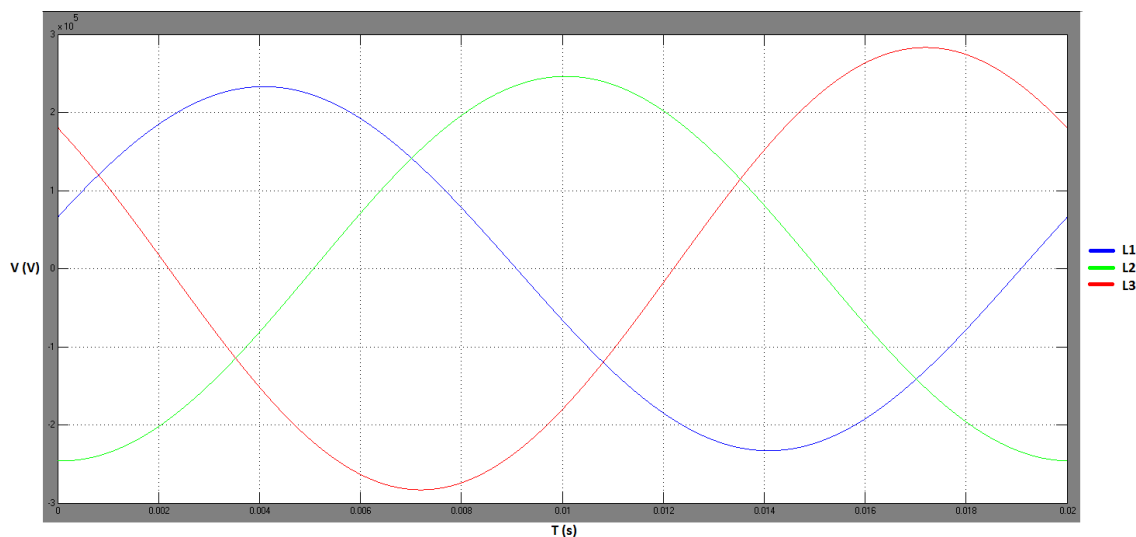
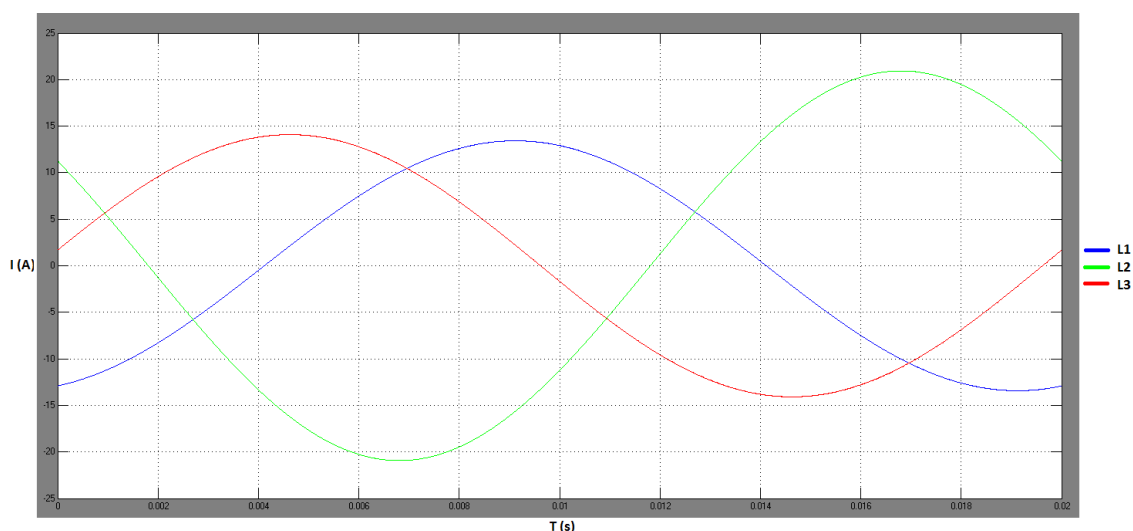


Figura 38 - Tensão da rede cenário 3



**Figura 39 - Corrente na rede cenário 3**

Agora com duas locomotivas em movimento, uma em cada sector da catenária seria de esperar uma menor perturbação em toda a rede, estando assim as correntes nas fases mais equilibradas.

Contudo verifica-se uma queda de tensão na rede bastante significativa com este aumento de carga, existindo também diferenças no que se refere aos valores de pico de tensão.

Relativamente às correntes na rede podemos observar que a corrente na fase L2 é a que possui um valor mais elevado, sendo isto explicado por se tratar da fase comum aos dois transformadores que alimentam os sectores de catenária "A" e "B", daí ser-lhe solicitada mais corrente em comparação com as outras fases.

Em comparação com o cenário 1 podemos verificar que existe um menor desequilíbrio entre as correntes, no que se refere ao desfasamento entre elas, existindo no entanto um desequilíbrio significativo entre estas:

- 135° entre a fase L1 e L2;
- 140° entre a fase L2 e L3;
- 85° entre a fase L3 e L1.

De referir que o desfasamento "normal" é de 120° entre todas elas. Este desequilíbrio pode ser explicado pela correlação que existe entre as fases L1 e L2 na alimentação de um dos transformadores da subestação de tração, e pela mesma

correlação entre as fases L2 e L3 na alimentação do outro transformador da subestação. Sendo o desfasamento entre estas fases praticamente idêntico, ao contrário do desfasamento entre as fases L1 e L3 que não se encontram diretamente relacionadas. Mais uma vez este desfasamento pode ser explicado por o transformador tentar criar um efeito de oposição nas fases que o alimentam.

Sendo as cargas praticamente indutivas teremos novamente um desfasamento das correntes relativamente às tensões, estando estas em atraso.

### **6.3.4 Cenário 4**

Neste cenário, foi efetuada a simulação de uma locomotiva em movimento com uma velocidade constante de 80 km/h que atravessa uma zona neutra, passando do sector de catenária "A" para o sector de catenária "B". Onde posteriormente foram retirados os seguintes gráficos de tensões e correntes no ponto "Z" da rede, como indicado na Figura 30.

Quando uma locomotiva atravessa uma zona neutra, de modo a não provocar um curto-circuito entre os diferentes sectores de catenária, o que é feito é um desacoplamento de carga. Ou seja, é retirada de alimentação a locomotiva num momento antes desta atravessar a zona neutra, e é feito o acoplamento da mesma depois de atravessada a zona neutra. Devido à massa da locomotiva e a toda a inercia que a mesma possui no momento em que atravessa a zona neutra, esta passa a zona neutra sem alimentação e praticamente sem perder velocidade.

O ponto "B", caracterizado nos seguintes gráficos de tensões e correntes como uma linha vertical representa o momento de desacoplamento, ou acoplamento de carga respetivamente.

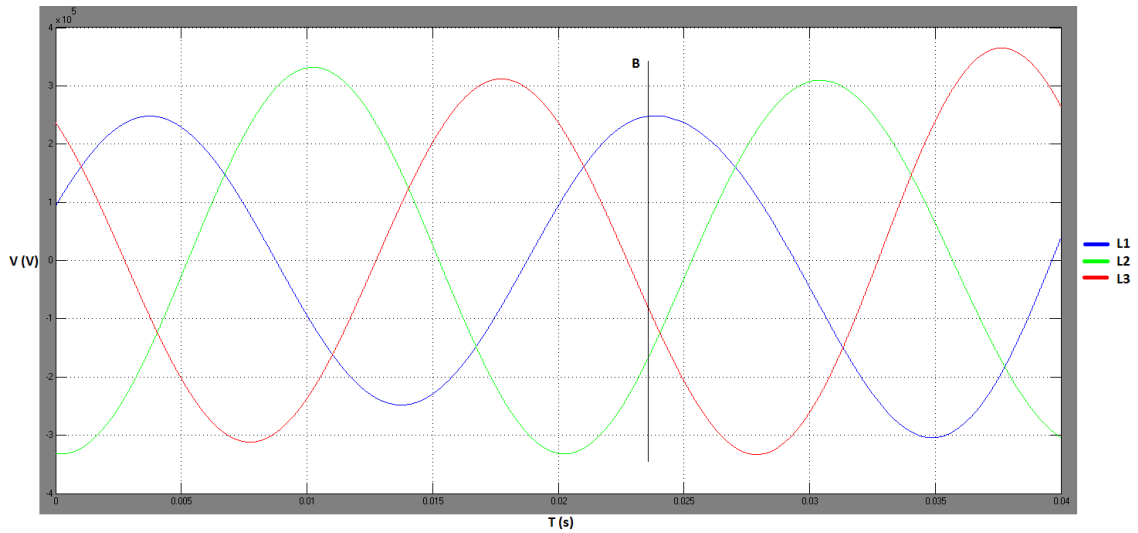


Figura 40 - Tensão da rede cenário 4 - desacoplamento de carga

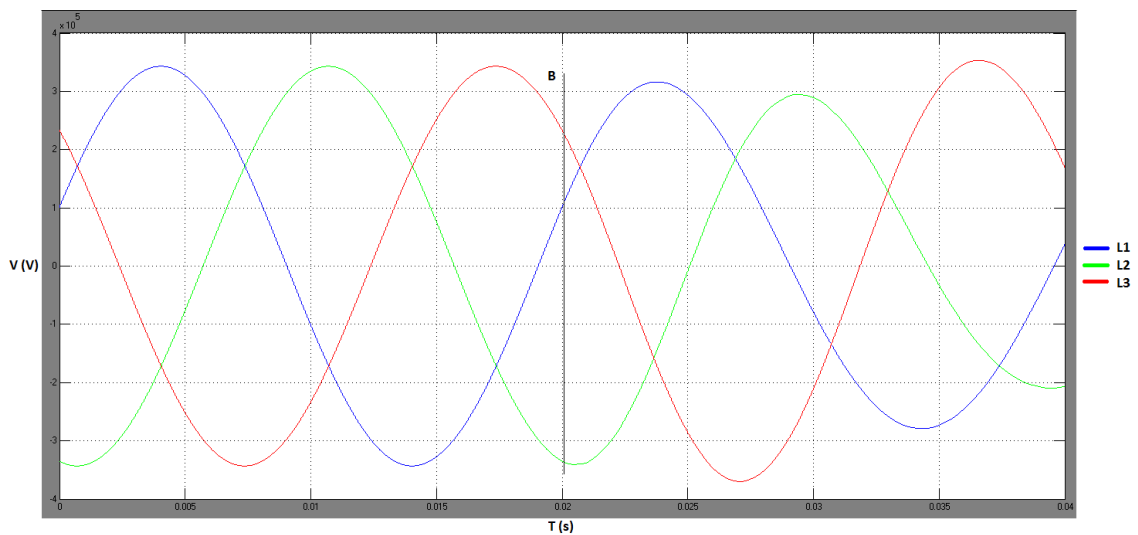
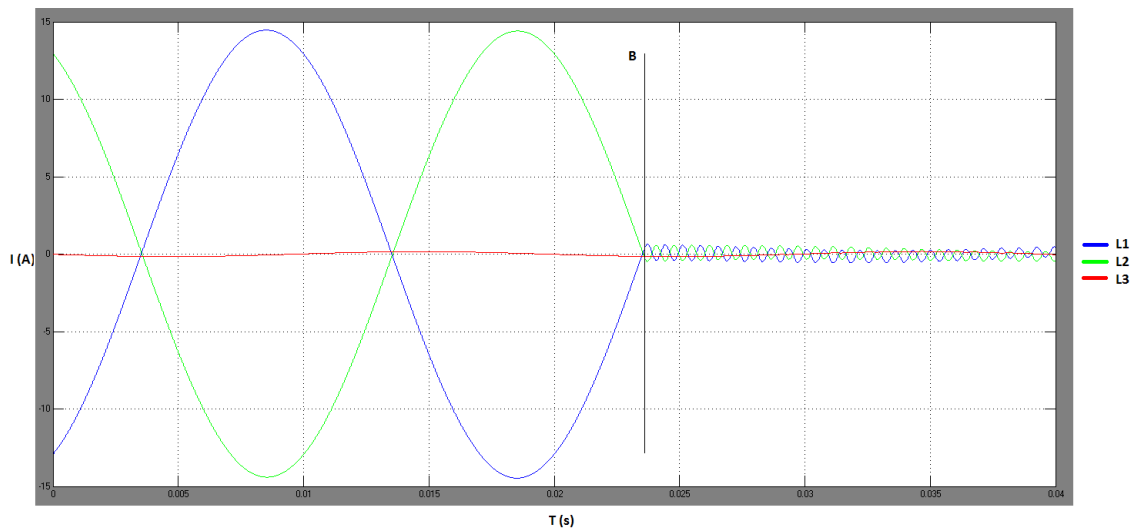
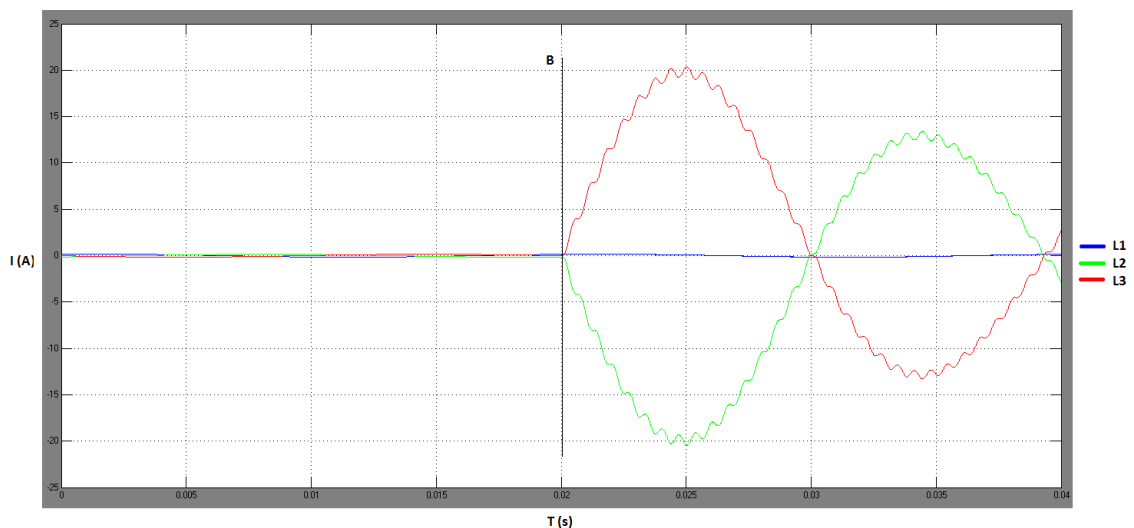


Figura 41 - Tensão da rede cenário 4 - acoplamento de carga



**Figura 42 - Corrente na rede cenário 4 - desacoplamento de carga**



**Figura 43 - Corrente na rede cenário 4 - acoplamento de carga**

No primeiro gráfico de tensões, que representa o desacoplamento de carga, podemos verificar que as tensões tendem a estabilizar após a retirada de carga, ainda que se notem pequenas perturbações nos instantes iniciais. Já no gráfico que representa o acoplamento de carga, a tensão no momento inicial encontra-se equilibrada e todas as tensões possuem o mesmo valor de pico. Depois de acoplada a carga verificam-se perturbações na rede, quer a nível de defasamento entre tensões quer a nível de valores de pico.

No que respeita às correntes na rede, no instante inicial antes do desacoplamento de carga podemos verificar que o gráfico de correntes é exatamente igual ao do

cenário 1, como seria expectável, sendo a corrente na fase L3 praticamente nula e o desfasamento entre a corrente na fase L1 e L2 de 180°. Depois de desacoplada a carga verificou-se que os valores de corrente caem abruptamente para muito perto de zero, gerando uma corrente L1 e L2 nos instantes iniciais com 0,5 A de valor de pico e cerca de 1500 Hz de frequência, sendo estas perturbações a resposta da rede à saída súbita de carga.

No gráfico que representa o posterior acoplamento da carga podemos verificar, no instante inicial, que as correntes são praticamente nulas, sendo iguais às do gráfico de correntes retirado na simulação em vazio. Depois de acoplada a carga, a corrente sobe instantaneamente para um valor de pico de cerca de 20 A, e tende a estabilizar nos 15 A, como na simulação do cenário 1. Verifica-se também o mesmo desfasamento de 180° entre correntes, mas neste caso entre as correntes L2 e L3, sendo estas as fases que alimentam o sector de catenária "B". Nos primeiros ciclos de onda de corrente verificam-se ainda perturbações na onda sinusoidal, existindo tremulações na mesma com uma frequência de cerca de 1500 Hz, a mesma frequência das perturbações existentes aquando do desacoplamento de carga.

## 6.4 Sistema 2x25 kV

Com o objetivo de analisar e comparar o comportamento dos sistemas de tração elétrica consideramos neste capítulo uma alimentação do sistema a 2x25 kV com alimentação bifásica, através das fases L1 e L2, sendo considerados diversos cenários onde posteriormente é feita uma análise crítica dos impactos encontrados na rede de transporte.

Podemos observar de seguida os critérios considerados para os cenários de simulação.

### ➤ Cenário 1

Carga móvel de potência constante.

O objetivo deste cenário é a verificação do comportamento da rede de transporte no que respeita a desequilíbrios de tensões, correntes e eventuais perturbações harmónicas na rede.

➤ **Cenário 2**

Carga fixa de potência constante.

O objetivo deste cenário é a comparação com o cenário 1, onde poderemos verificar se a consideração de uma carga móvel ao invés de uma carga fixa na simulação trará alterações significativas na rede de transporte.

➤ **Cenário 3**

Duas cargas móveis de potência constante em diferentes troços da catenária.

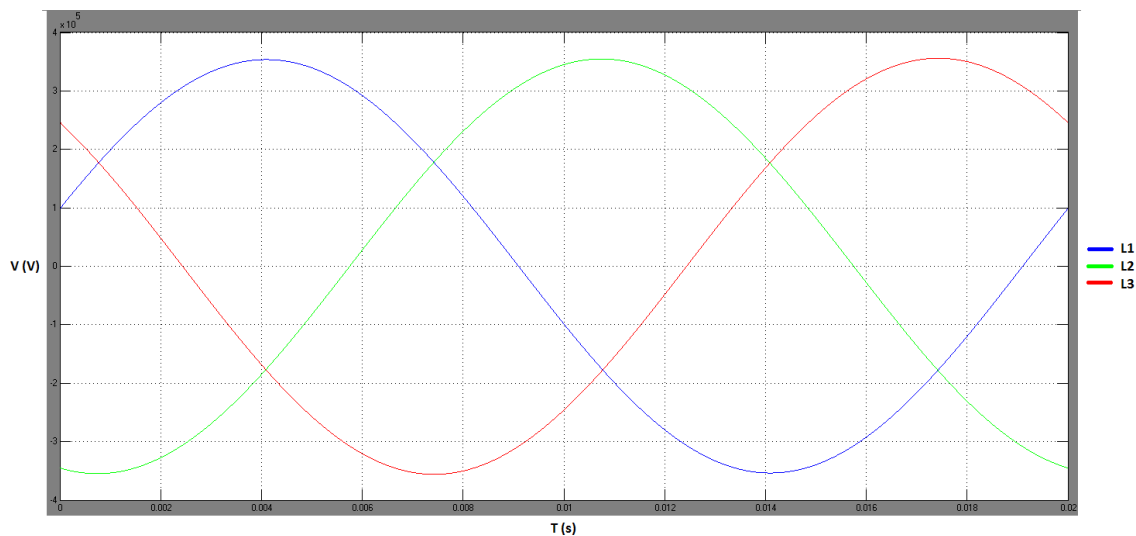
O objetivo deste cenário é a comparação com o cenário 1, onde poderemos verificar as alterações na rede com o aumento da potência solicitada.

➤ **Cenário 4**

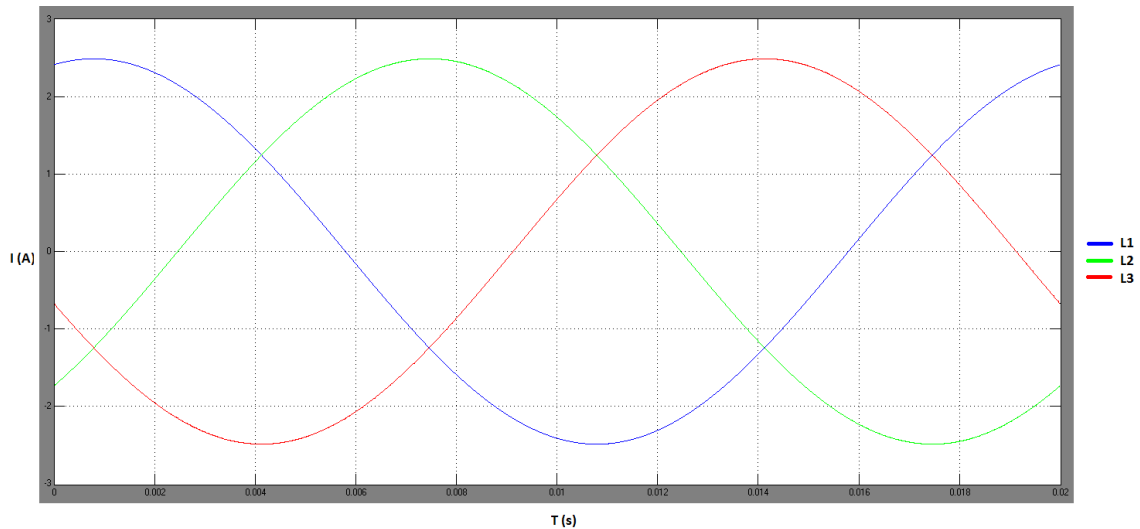
Carga móvel de potência constante a atravessar uma zona neutra.

O objetivo deste cenário é a verificação do comportamento da rede de transporte no que respeita a desequilíbrios de tensões, correntes e eventuais perturbações harmónicas na rede.

De seguida podemos verificar o gráfico de tensões e correntes na rede de transporte para o sistema em vazio, ou seja sem nenhuma locomotiva em funcionamento, o qual servirá de base para comparação com os diferentes cenários.



**Figura 44 - Tensão da rede em vazio**



**Figura 45 - Corrente na rede em vazio**

Relativamente ao gráfico das tensões, podemos verificar que as mesmas se encontram equilibradas e com o mesmo valor de pico, não existindo assim perturbações nas tensões da rede quando o sistema 2x25 kV se encontra em vazio.

Já o gráfico das correntes apresenta um ligeiro desfasamento relativamente ao gráfico das tensões, estando o gráfico das correntes em avanço em relação ao das tensões. Isto verifica-se devido ao facto de em vazio a linha de transmissão possuir uma característica capacitiva, explicando assim este ligeiro desfasamento de 50°. A característica capacitiva das linhas assim como as perdas na rede explicam os valores de amplitude de corrente.

## 6.4.1 Cenário 1

Neste cenário foi simulada uma locomotiva em movimento com uma velocidade constante de 80 km/h, que se desloca no sector de catenária "A", onde foram depois retirados os seguintes gráficos de tensões e correntes no ponto "Z" da rede, como indicado na Figura 30.

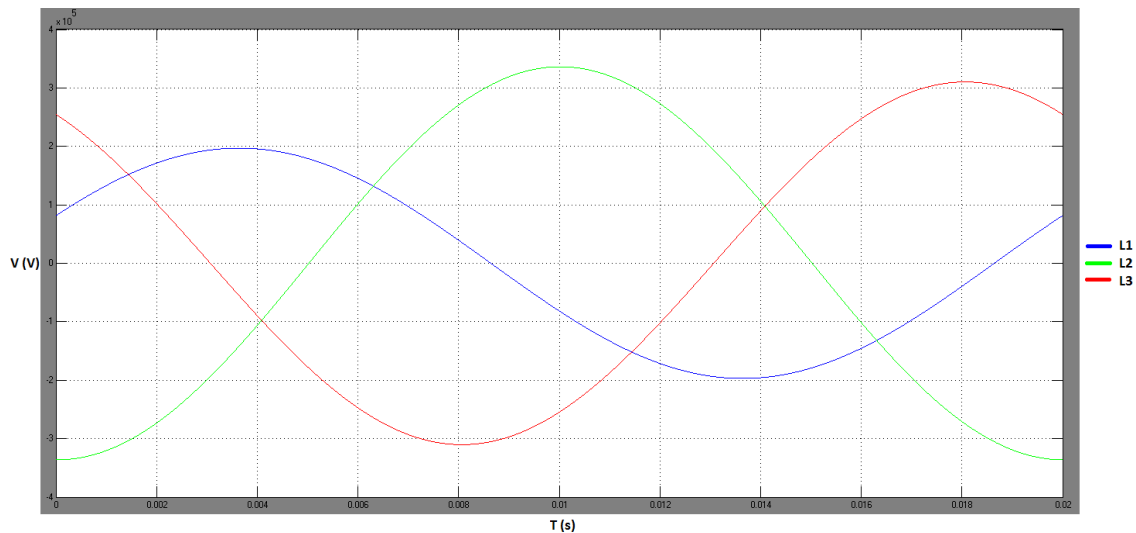


Figura 46 - Tensão da rede cenário 1

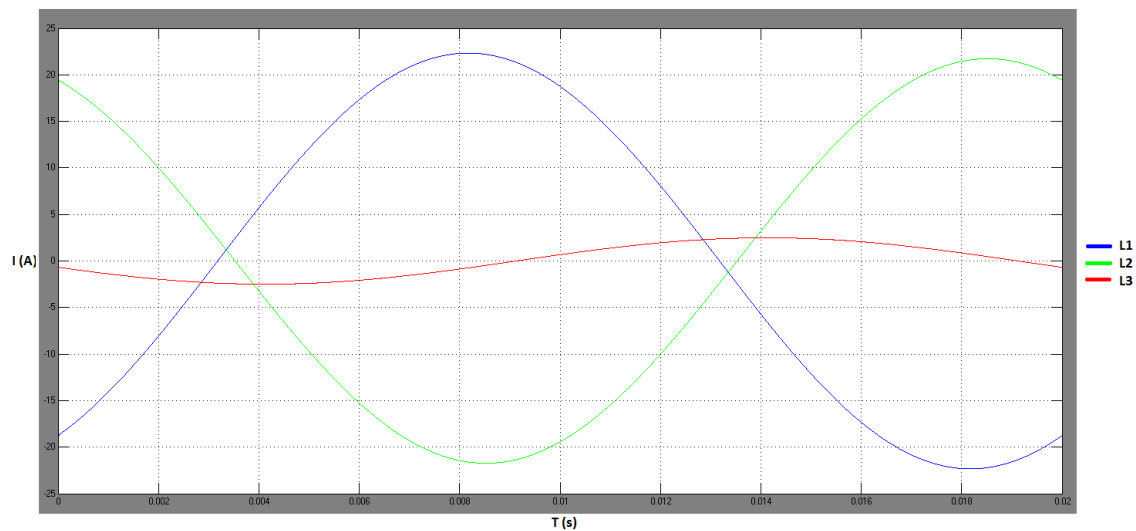


Figura 47 - Corrente na rede cenário 1

Como podemos observar com uma locomotiva em movimento verificam-se perturbações na rede quer ao nível do gráfico de tensões quer no gráfico de correntes.

No que se refere ao gráfico de tensões existem perturbações significativas, estando estas de certa forma relacionadas com as perturbações nas correntes.

Em relação às correntes na rede podemos observar que a corrente na fase L3 é bastante reduzida, sendo igual à corrente registada na simulação em vazio. Devendo se isto ao facto de a subestação de tração ser apenas alimentada pelas fases L1 e L2.

Verificamos ainda um desfasamento entre as correntes L1 e L2 de aproximadamente  $180^\circ$ , sendo o desfasamento na simulação em vazio de  $120^\circ$ . Este desfasamento pode ser explicado pelo facto de as fases L1 e L2 se encontrarem a alimentar uma carga através de um transformador monofásico, que "cria" um efeito de oposição nestas mesmas fases.

O facto de a carga ser praticamente indutiva explica o desfasamento das correntes relativamente às tensões, estando estas em atraso. Sendo este atraso de aproximadamente  $85^\circ$  para a corrente L1 e de  $145^\circ$  para a corrente L2.

## 6.4.2 Cenário 2

Neste cenário foi simulada uma carga estacionária, com uma potência constante igual à de uma locomotiva a velocidade constante de 80 km/h, que se encontra no ponto quilómetro (pk) 20 no sector de catenária "A", onde foram depois retirados os seguintes gráficos de tensões e correntes no ponto "Z" da rede, como indicado na Figura 30.

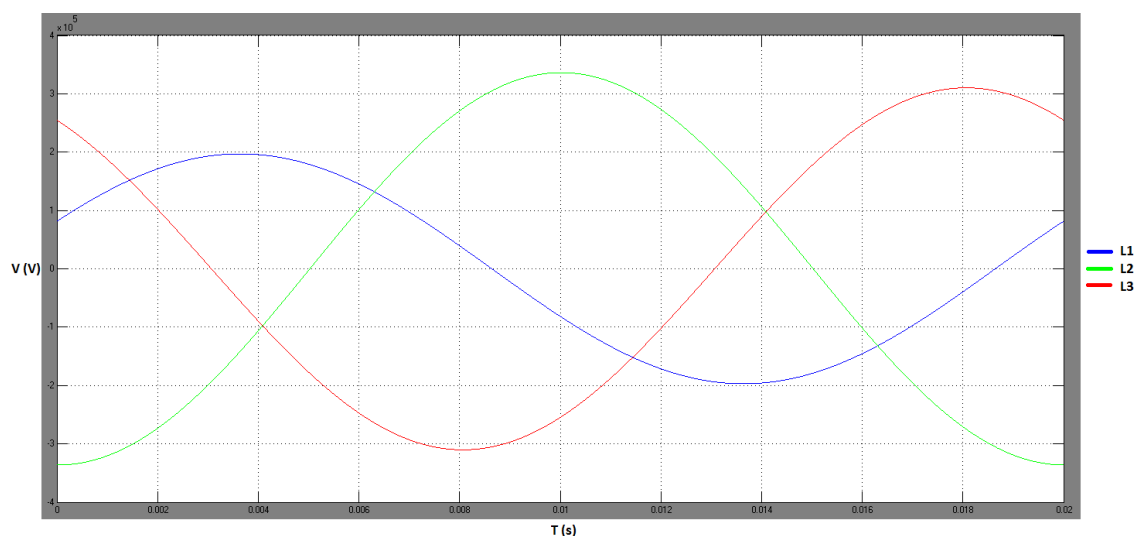
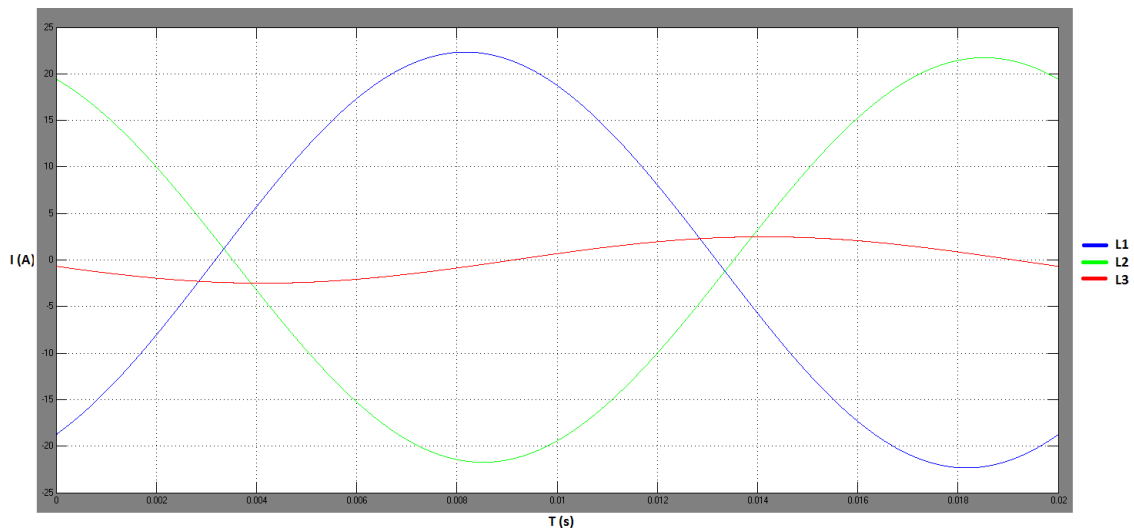


Figura 48 - Tensão da rede cenário 2



**Figura 49 - Corrente na rede cenário 2**

Comparativamente com o cenário 1 não existe qualquer diferença significativa nos gráficos obtidos, tanto no gráfico de tensões como no gráfico de correntes. O facto de considerarmos uma carga fixa ou uma carga móvel que se desloca ao longo da catenária só trará alterações significativas para uma análise a jusante da subestação de tração, onde as alterações da impedância da linha em função do tempo serão mais notórias.

No nosso caso, onde pretendemos verificar os impactos na rede de transmissão, a alteração da impedância da linha trará apenas diferenças mínimas não perceptíveis no gráfico de correntes.

### 6.4.3 Cenário 3

Neste cenário foi efetuada a simulação de duas locomotivas em movimento com uma velocidade constante de 80 km/h, que se deslocam uma no sector de catenária "A" e outra no sector de catenária "B", onde foram depois retirados os seguintes gráficos de tensões e correntes no ponto "Z" da rede, como indicado na Figura 30.

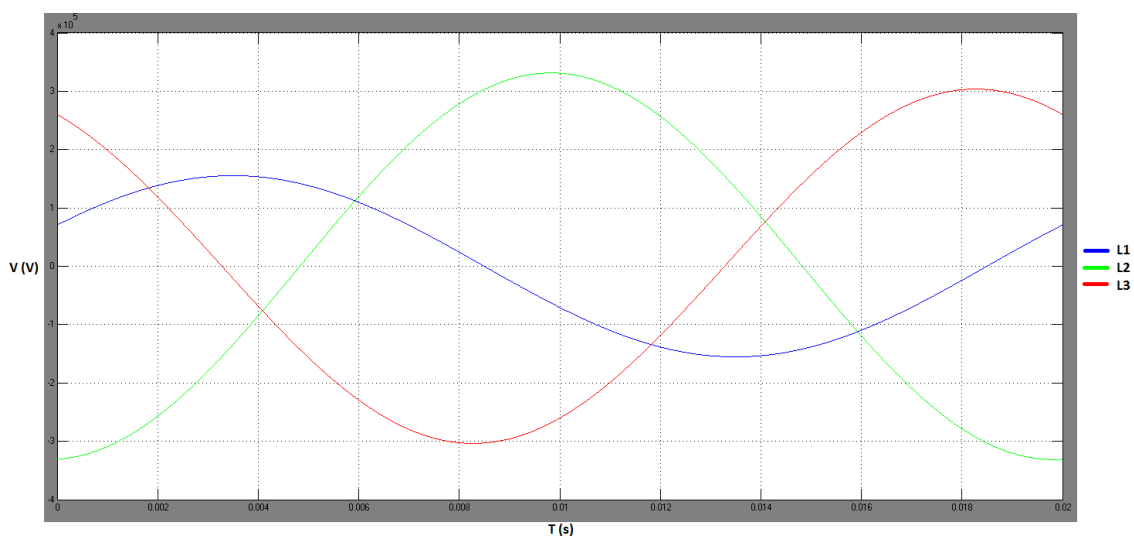


Figura 50 - Tensão da rede cenário 3

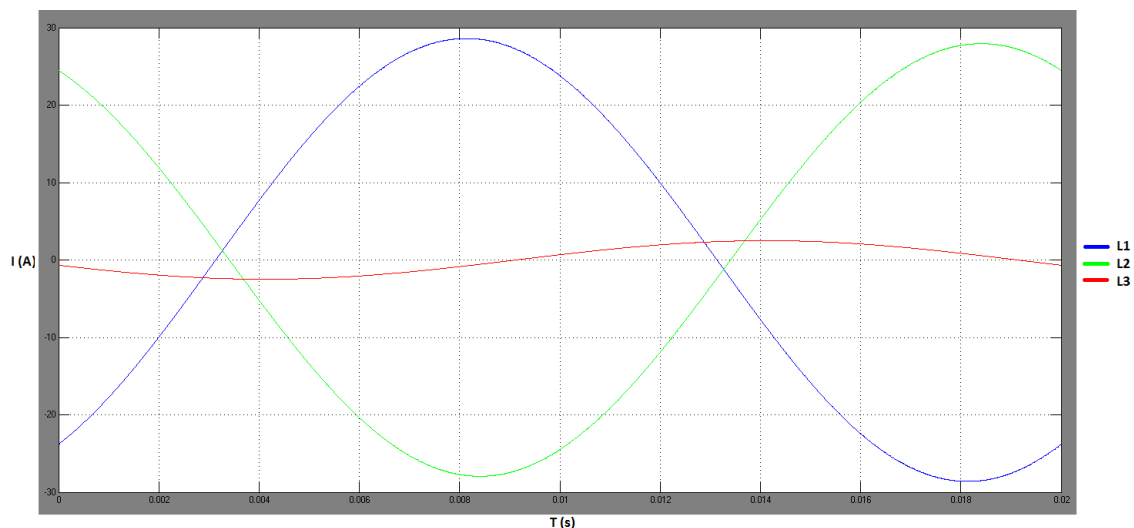


Figura 51 - Corrente na rede cenário 3

Agora com duas locomotivas em movimento, uma em cada sector da catenária, e uma vez que ambos os sectores da catenária são alimentados pelas mesmas fases, será de esperar uma maior perturbação em toda a rede, pois comparativamente com o cenário 1, estamos de certa forma a aumentar a potência solicitada à rede.

No que se refere ao gráfico de tensões, comparativamente com o do cenário 1, as perturbações são mais significativas, especialmente para a fase L1. Podemos assim concluir que, neste cenário, quanto maior o aumento de carga maior será a queda de tensão na fase L1.

Já no gráfico de correntes em comparação com o do cenário 1, as diferenças que podemos observar são apenas nos valores de corrente para as fases L1 e L2, sendo estas superiores em cerca de 25%.

#### **6.4.4 Cenário 4**

Neste cenário, foi efetuada a simulação de uma locomotiva em movimento com uma velocidade constante de 80 km/h que atravessa uma zona neutra, passando do sector de catenária "A" para o sector de catenária "B". Onde posteriormente foram retirados os seguintes gráficos de tensões e correntes no ponto "Z" da rede, como indicado na Figura 30.

Quando uma locomotiva atravessa uma zona neutra, de modo a não provocar um curto-circuito entre os diferentes sectores de catenária, o que é feito é um desacoplamento de carga. Ou seja, é retirada de alimentação a locomotiva num momento antes desta atravessar a zona neutra, e o acoplamento da mesma depois de atravessada a zona neutra. Devido à massa da locomotiva e de toda a inercia que a mesma possui no momento em que atravessa a zona neutra, esta passa a zona neutra sem alimentação praticamente sem perder velocidade.

O ponto "B", caracterizado nos seguintes gráficos de tensões e correntes como uma linha vertical representa o momento de desacoplamento, ou acoplamento de carga respetivamente.

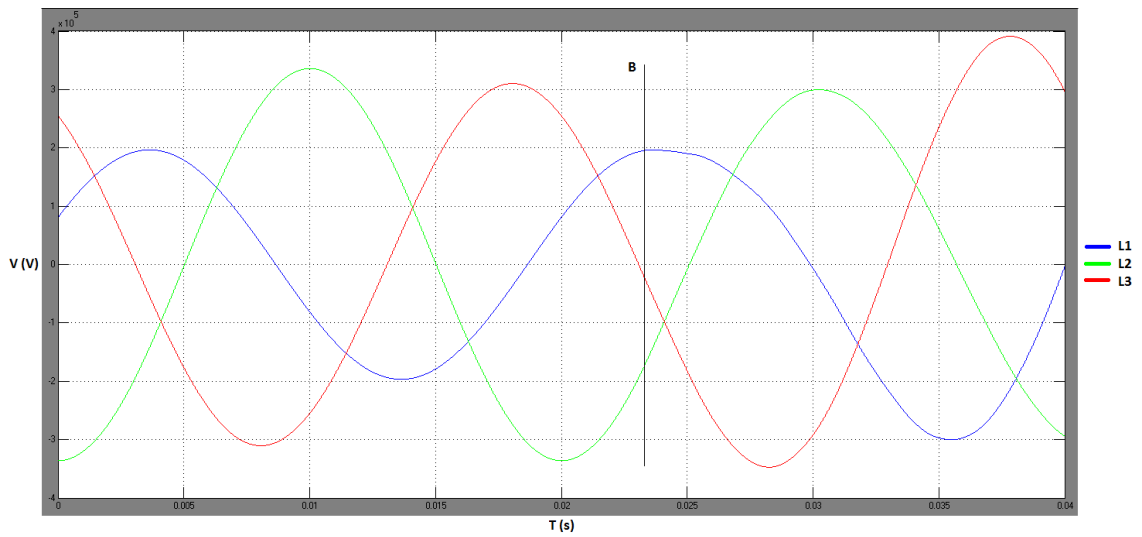


Figura 52 - Tensão da rede cenário 4 - desacoplamento de carga

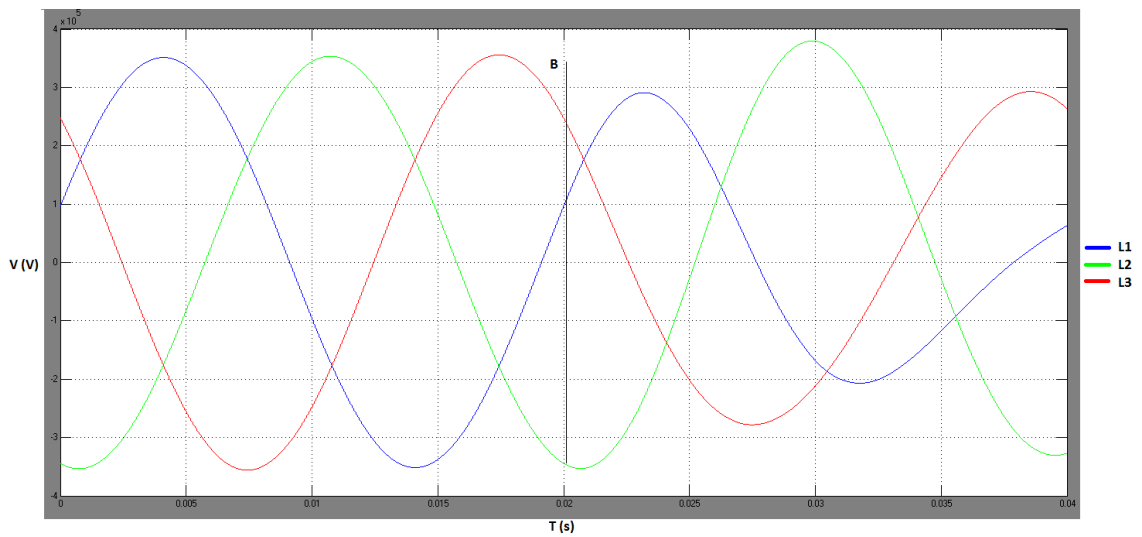


Figura 53 - Tensão da rede cenário 4 - acoplamento de carga

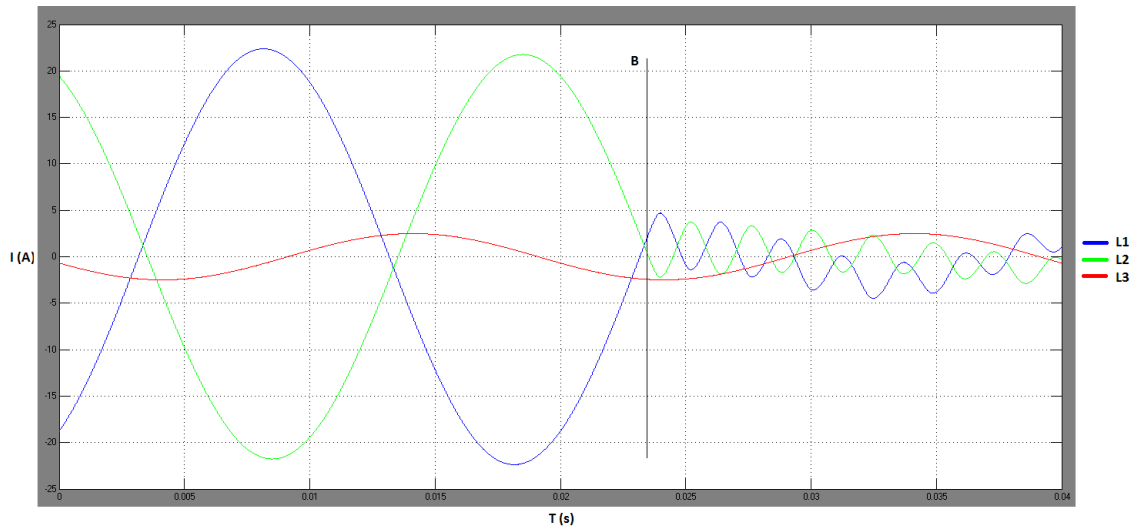


Figura 54 - Corrente na rede cenário 4 - desacoplamento de carga

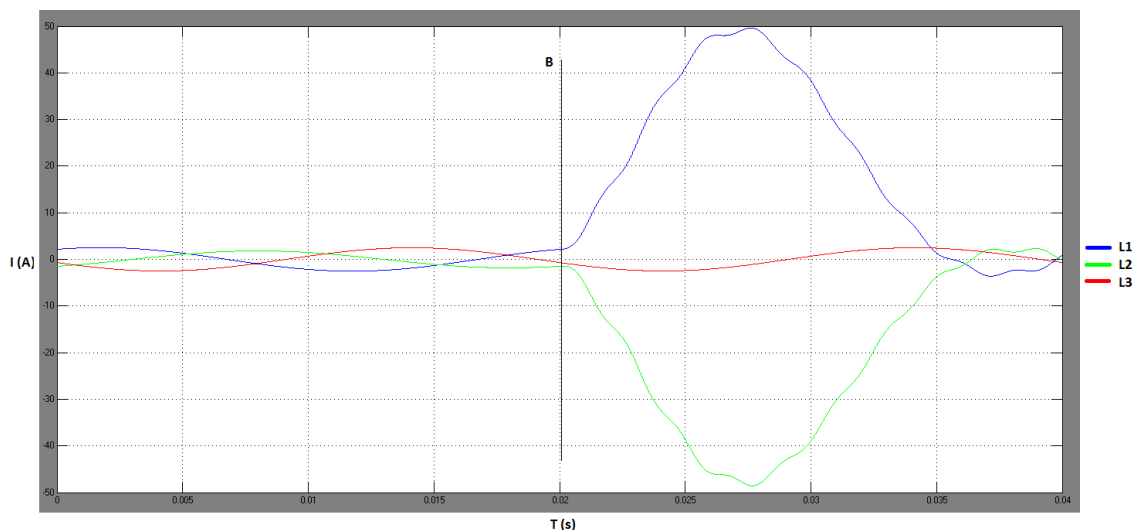


Figura 55 - Corrente na rede cenário 4 - acoplamento de carga

No primeiro gráfico de tensões que representa o desacoplamento de carga podemos verificar que as tensões tendem a estabilizar após a retirada de carga, ainda que nos instantes iniciais se verifiquem uns picos de tensão na fase L3. Já no gráfico que representa o acoplamento de carga, a tensão no momento inicial encontra-se equilibrada e todas as tensões possuem o mesmo valor de pico, sendo exatamente igual ao gráfico retirado da simulação em vazio. Depois de acoplada a carga verificam-se perturbações na rede, com uma queda ao nível tensão para a fase L1 e um desfasamento entre tensões. Sendo este desfasamento facilmente observado quando analisado o gráfico entre o período 0,03 e 0,04 segundos, onde se pode ver claramente a fase L1 em atraso relativamente às outras.

No que respeita às correntes na rede, no instante inicial antes do desacoplamento de carga podemos verificar que o gráfico de correntes é exatamente igual ao do cenário 1, como seria expectável, sendo a corrente na fase L3 bastante reduzida e o desfasamento entre a corrente na fase L1 e L2 de aproximadamente 180°. Depois de desacoplada a carga verificou-se que os valores de corrente L1 e L2 caem abruptamente para valores próximos da corrente L3, gerando-se assim uma corrente L1 e L2 nos instantes iniciais com 2 A de valor médio de pico e cerca de 400 Hz de frequência, sendo estas perturbações a resposta da rede à saída abrupta de carga.

No gráfico que representa o posterior acoplamento da carga, no instante inicial podemos verificar que as correntes são muito reduzidas, e iguais às do gráfico de correntes retirado na simulação em vazio. Depois de acoplada a carga, a corrente sobe para um valor de pico no primeiro meio ciclo de onda de cerca de 50 A, e tende a estabilizar nos 22 A, como na simulação do cenário 1. Verifica-se também o mesmo desfasamento de 180° entre correntes, sendo que nos primeiros ciclos de onda de corrente verificam-se perturbações na onda sinusoidal, as mesmas perturbações que se verificam no desacoplamento de carga e que ocorrem como resposta à abrupta diferença de carga na rede.

## 6.5 Conclusões

Depois de simulados os vários cenários para ambos os sistemas de alimentação e retiradas as ilações para cada um deles, iremos agora neste ponto comparar os diferentes sistemas de alimentação em função dos cenários simulados.

Na simulação em vazio de ambos os sistemas de alimentação podemos ver que as tensões não sofrem qualquer alteração. Já os gráficos de corrente apresentam diferenças, principalmente nos valores de pico, sendo a corrente mais elevada para o sistema de 2x25 kV. Isto pode ser explicado pelo facto de, mesmo em vazio, este sistema alimentar os autotransformadores o que provoca maiores perdas.

Nos cenários 1, onde simulamos uma carga móvel de potência constante, neste caso uma locomotiva que se encontrava em movimento com uma velocidade constante de 80 km/h no sector de catenária "A", verificamos um comportamento muito idêntico em ambas as simulações. No gráfico de tensões as diferenças que

podemos notar foram em termos de queda de tensão na fase L1, sendo esta mais significativa para a simulação de 2x25 kV. Os gráficos de corrente são em tudo idênticos, sendo as diferenças entre eles apenas no que se refere aos valores de pico de corrente, sendo as correntes mais elevadas para a simulação de 2x25 kV, explicando também assim a maior queda de tensão verificada no gráfico de tensões da mesma simulação.

Os cenários 2 serviram principalmente para serem comparados com os cenários 1 de cada sistema de alimentação, não sendo a comparação entre sistemas neste caso muito diferente da já feita anteriormente entre os cenários 1.

Nos cenários 3 simulamos o movimento de duas locomotivas, uma em cada secção da catenária. A comparação entre as diferentes alimentações não seria inteiramente correta, uma vez que no sistema 1x25 kV os sectores de catenária são alimentados por fases diferentes. Já no sistema 2x25 kV ambos os sectores de catenária são alimentados pelas mesmas duas fases. Assim verificamos que no sistema 1x25 kV com duas locomotivas em diferentes sectores de catenária, as perturbações na rede são menores, encontrando-se as fases mais equilibradas. Já no sistema 2x25 kV as perturbações só tendem a aumentar visto as fases continuarem em desequilíbrio.

Por ultimo, nos cenários 4 simulámos a passagem de uma locomotiva por uma zona neutra. As perturbações quer no desacoplamento de carga, quer no posterior acoplamento da mesma, são em tudo idênticas, existindo perturbações significativas em ambas as simulações no que se refere aos gráficos de corrente, no momento seguinte à diferença abrupta de carga. A grande diferença entre os dois cenários é a frequência das perturbações resultantes. No caso 1x25 kV é de 1500 Hz e no 2x25 kV é de 400 Hz.

## Capítulo 7

### Conclusão

Durante todos os capítulos anteriores foram sendo retiradas ilações sobre cada capítulo. Assim sendo, neste capítulo serão apresentadas apenas as conclusões gerais das simulações realizadas sobre os impactos na rede de transmissão por parte das subestações de tração 1x25 kV e 2x25 kV. Finalizando com a apresentação de possíveis trabalhos futuros a realizar sobre este tema.

Devido ao facto de ser um meio de transporte seguro, rápido e económico a rede de transporte ferroviária é um dos meios de transportes mais utilizados para longas distâncias e daí a sua grande evolução ao longo do tempo. Com isto a análise do impacto que este sistema tem na nossa rede de transporte, vem sendo cada vez mais de extrema importância, para através dessa análise podermos estar preparados para colmatar qualquer destes impactos.

Como podemos observar o sistema 1x25 kV é o sistema mais utilizado a nível nacional, contando com uma extensão de 1210 km, devendo-se isto ao facto de ser um sistema mais antigo, mas também por se tratar de um sistema com algumas vantagens em relação ao 2x25 kV. O sistema 1x25 kV, quando em vazio, apresenta perdas menores que o outro sistema, pois não possui autotransformadores na sua constituição.

Relativamente aos desequilíbrios de corrente e consequentemente de tensão verificados na simulação do sistema 1x25 kV, é importante referir que nos encontrávamos a criar cenários de carga com apenas uma subestação de tração. Esta

análise foi feita o mais a jusante da rede de transmissão, onde seriam mais notórios os impactos na rede. Tendo em consideração que, como referimos anteriormente este é o sistema de alimentação de tração mais utilizado em território nacional. É um transporte público bastante utilizado. Possui diversas locomotivas em movimento a todo o instante e os desequilíbrios observados nas simulações realizadas não serão tão notórios numa utilização mais massiva como é o caso do sistema de tração elétrico nacional. De referir que os desequilíbrios que advém da utilização de apenas duas das fases por sector de catenária seriam anulados com o aumento da dimensão deste sistema.

O sistema 2x25 kV é o sistema mais atual no sistema de tração elétrico nacional e encontra-se ainda pouco explorado. A linha da Beira Alta com 202 km de catenária é a única que funciona neste sistema. As principais vantagens deste sistema em relação ao sistema 1x25 kV é o facto de possibilitar uma maior distância entre subestações de tração porque possui autotransformadores ao longo da catenária assim como uma outra linha de alimentação negativa, a linha de *feeder*. A transmissão de energia é feita a uma tensão de 50 kV, ou seja o dobro do sistema 1x25 kV, reduzindo assim as quedas de tensão na linha.

Os desequilíbrios de tensão neste sistema, mesmo que num cenário real no sistema de tração nacional, serão mais elevados e notórios que no sistema 1x25 kV, por se tratar de uma rede menor e com um menor número de locomotivas a circular nesta rede. Mas como o sistema 1x25 kV e o 2x25 kV funcionam acoplados à mesma rede de transmissão, os impactos na referida rede serão reduzidos no que diz respeito a desequilíbrios de tensão.

## 7.1 Trabalhos Futuros

Procurou-se com este trabalho efetuar uma análise técnica acerca do impacto na rede de transmissão dos sistemas de tração elétrica considerando diversos cenários possíveis de acontecer na rede de tração. No entanto, podem-se efetuar diversas análises sobre este tema que poderão ser executadas como trabalhos futuros. Nos pontos que se seguem, é feita uma apresentação das possíveis análises que se poderão fazer dando um contributo importante para o estudo do comportamento da rede de transmissão face às alterações na rede de tração.

- Análise de uma rede de transmissão e de tração mais complexas, com um maior número de barramentos e subestações.

A simulação de uma rede de maior dimensão nomeadamente, com maior número de barramentos e subestações de tração, permitiria retirar conclusões relativamente às questões técnicas da rede, como por exemplo os desequilíbrios de tensão, que tenderiam a diminuir com o aumento do número de subestações de tração.

- Análise em diferentes pontos da rede de transmissão

Uma análise de diversos pontos numa rede mais complexa poderá explicar fenómenos que podem ter origem na configuração da rede e não na rede de tração. Muito provavelmente poderíamos também observar que os impactos na rede seriam menores quanto mais a montante fossem efetuadas as medidas na rede de transmissão.

- Simulação de defeitos na rede de tração e impactos na rede de transmissão

A ocorrência de defeitos a jusante numa rede têm impacto em toda a rede sendo assim, da maior importância a análise destes na rede de tração e qual o impacto que os mesmos possam ter na rede de transmissão a montante.



## Capítulo 8

### Referências e Anexos

#### 8.1 Referências Bibliográficas

- [1] Manuel Vaz Guedes - Introdução à Tração Elétrica (2000). Página consultada em 20 de Junho de 2012. Disponível em <<http://www.eletricidade.net/fotos/locomotiva.pdf>>.
  
- [2] Public Service Commission of Wisconsin - Electricity: From Power Plants to Consumers (05 Nov. 2009). Página consultada em 15 de Maio de 2012. Disponível em <<http://psc.wi.gov/thelibrary/publications/electric/electric09.pdf>>.
  
- [3] Marco Filipe do Carmo Pereira dos Santos - Análise de Redes em Sistemas de tração. Lisboa, 2008. Dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores.
  
- [4] REN - Rede Elétrica Nacional, S.A. - Caracterização da Rede Nacional de Transporte para Efeitos de Acesso à Rede em 31 de Dezembro de 2011 (Março 2012).

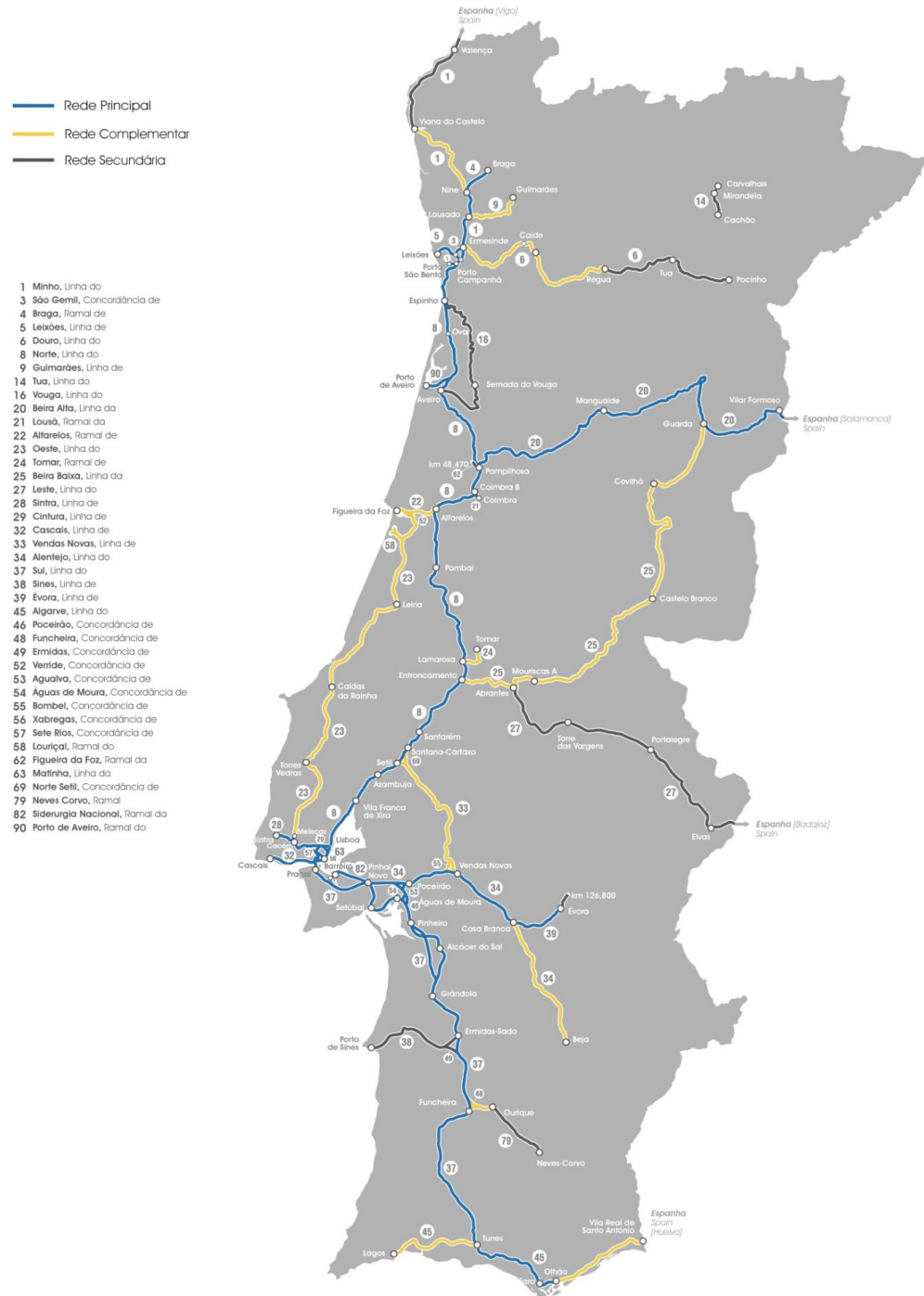
- [5] GE Digital Energy - Transmission Line Protection Principles. Página consultada em 15 de Maio de 2012. Disponível em <<http://www.gedigitalenergy.com/smartgrid/Dec07/1-transmission.pdf>>.
- [6] Página consultada em 15 de Maio de 2012. Disponível em <<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/3527/Dissert%202-FAL%20vfinal%20-%20pos%20defesa.pdf;jsessionid=857E3ECD5B906D69383DA3FEC79E185D?sequence=9>>.
- [7] James H. Harlow - Electric power transformer engineering. CRC Press LLC 2004. ISBN 0-8493-1704-5
- [8] José António Beleza Carvalho - Transformadores (2005). Instituto Superior de Engenharia do Porto - Departamento de Engenharia Eletrotécnica
- [9] Página consultada em 15 de Maio de 2012. Disponível em <[http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/2503/mod\\_resource/content/1/teo\\_transformadores.pdf](http://disciplinas.stoa.usp.br/pluginfile.php/2503/mod_resource/content/1/teo_transformadores.pdf)>.
- [10] Apostila 2 - Disciplina de Conversão de Energia B - Introdução à Máquina Síncrona. Página consultada em 16 de Maio de 2012. Disponível em <[ftp://ftp.unilins.edu.br/etl/T\\_cnico%20em%20Eletroeletr\\_nica%20-%20ETL%20de%20Lins/1\\_%20Turma%202006/M\\_quinas%20EL\\_tricas%203/Apostila\\_MS.pdf](ftp://ftp.unilins.edu.br/etl/T_cnico%20em%20Eletroeletr_nica%20-%20ETL%20de%20Lins/1_%20Turma%202006/M_quinas%20EL_tricas%203/Apostila_MS.pdf)>.
- [11] Gil Marques - Maquinas Síncronas (2001). Página consultada em 16 de Maio de 2012. Disponível em <<http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/vasco/CEE-CAP%202.pdf>>.
- [12] Eduardo Ferreira; Luís Cunha - Instalações Fixas de Tração Elétrica.
- [13] Francisco Salvador - Sistemas de Energia de Tração Elétrica. EFACEC.
- [14] REFER - Infraestrutura Ferroviária, Energia de Tração - Subestações.
-

- [15] REFER - Energia de Tração.
- [16] Maurício Frederico - Subestações de Tração.
- [17] D. Zacarías Barcenilla Torres - 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] Eric William Jeffery Sheard - Evolução dos Sistemas de Catenária na Linha do Norte.
- [19] Domingos Pinto Gonçalves Raimundo - 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] EN50121, Railway applications - Electromagnetic compatibility
- [21] EN50122-1, Railway applications - Fixed installations - Part 1: Protective provisions relating to electrical safety and earthing
- [22] REFER - Conceitos de Catenária e Energia de Tração (2006).
- [23] Abdelsalam Mohamed Elhaffar - POWER TRANSMISSION LINE FAULT LOCATION BASED ON CURRENT TRAVELING WAVES. Helsínquia, 2008. Dissertação apresentada à Helsinki University of Technology - Faculty of Electronics, Communications and Automation - Department of Electrical Engineering para obtenção do Grau de Doutor.

- [24] Manuel Vaz Guedes - Máquinas Elétricas Síncronas, arranque dos motores síncronos (2003). Faculdade de Engenharia Universidade do Porto. Página consultada em 16 de Maio de 2012. Disponível em <[http://paginas.fe.up.pt/maquel/AD/MES\\_arranque.pdf](http://paginas.fe.up.pt/maquel/AD/MES_arranque.pdf)>.
- [25] Joaquim ventura; Tomás Pereira - Competências Locais em Subestações de Tração
- [26] Marcos García Viaño - DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN ALGORITMO AVANZADO DE FLUJO DE CARGAS PARA LA SIMULACIÓN DE LA ELECTRIFICACIÓN DE FERROCARRILES DE ALTA VELOCIDAD. Resumo de projeto apresentado à Universidad Pontificia de Comillas
- [27] Carlos Macieira dos Anjos - Projetos de Catenária
- [28] Nelson Dias Vieira - Manutenção / Conservação de Catenária. Porto 2006. Relatório de Estagio apresentado á Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

## 8.2 Anexos

### 8.2.1 Anexo 1



## 8.2.2 Anexo 2

Potência Motor (kW)	Potência Locomotiva (Hp)	Velocidade (km/h)	Esforço (kN)	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )	Potência Tração (kW)	Perdas Motor (kW)	Potência Motor Total (kW)	Perdas Linha Conversores (kW)	Perdas Conversores (kW)	Potência Transformador (kW)	Perdas Transformador (kW)	Potência Total Catenária (kW)	Corrente (A)
0	0	0	316	3,42	0	0	420	65	175	710	32	740	30
1370	7460	76	257	2,78	5480	110	6010	132	242	6368	192	6560	262
1370	7460	77	255	2,76	5480	110	6010	132	242	6368	192	6560	262
1370	7460	80	245	2,65	5480	110	6010	132	242	6368	192	6560	262
1370	7460	90	222	2,04	5480	110	6010	132	242	6368	192	6560	262
1370	7460	100	188	2,04	5480	110	6010	132	242	6368	192	6560	262
1370	7460	110	175	1,9	5480	110	6010	132	242	6368	192	6560	262
1370	7460	120	163	1,77	5480	110	6010	132	242	6368	192	6560	262
1370	7460	130	129	1,4	5480	110	6010	132	242	6368	192	6560	262
1370	7460	140	144	1,56	5480	110	6010	132	242	6368	192	6560	262
1370	7460	150	129	1,4	5480	110	6010	132	242	6368	192	6560	262
1370	7460	159	124	1,34	5480	110	6010	132	242	6368	192	6560	262
1350	7450	160	120	1,31	5400	110	5930	131	241	6292	188	6480	260