

NUNO MIGUEL CASTANHEIRO BOTELHO

**Estudo comparativo do Sistema de Alimentação de Catenária de
Corrente Alternada 1x25 kV vs 2x25 kV na rede de transmissão
ferroviária nacional**



**UNIVERSIDADE DO ALGARVE
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA**

2020

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

NUNO MIGUEL CASTANHEIRO BOTELHO

**Estudo comparativo do Sistema de Alimentação de Catenária de
Corrente Alternada 1x25 kV vs 2x25 kV na rede de transmissão
ferroviária nacional**

Mestrado em Engenharia Elétrica e Eletrónica
Especialidade de Sistemas de Energia e Controlo

Trabalho efetuado sob a orientação de:
Professor Doutor Luís Manuel Ramos de Oliveira



**UNIVERSIDADE DO ALGARVE
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA**

2020

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Estudo comparativo do Sistema de Alimentação de Catenária de Corrente Alternada 1x25 kV vs 2x25 kV na rede de transmissão ferroviária nacional

Declaração de autoria de trabalho

Declaro ser o autor deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'NUNO J. TEL'.

(Nuno Miguel Castanheiro Botelho)

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Copyright ©2020, Nuno Miguel Castanheiro Botelho

A Universidade do Algarve reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respetivos.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Resumo

No domínio elétrico, considera-se que a energia fornecida por um sistema elétrico tem qualidade quando garante o funcionamento do equipamento elétrico sem que se verifiquem alterações de desempenho significativas. Sendo a rede de tração ferroviária um sistema particular com grandes variações de carga e de forma acentuada, o seu funcionamento está dependente do correto dimensionamento por forma a suprimir eventos não desejáveis.

Os modos de exploração e manutenção de instalações de subestações de tração e postos de catenária são conduzidos para que esse bom funcionamento exista, não haja desequilíbrios significativos para a rede, diminuindo deste modo ocorrências anómalas, aumentando o ciclo de vida de todo o equipamento constituinte deste tipo de instalações.

O presente trabalho tem como objetivo principal caracterizar e comparar as redes que alimentam os veículos de tração elétrica desde as subestações até às locomotivas na rede de transmissão ferroviária nacional. Para o efeito será desenvolvido um modelo computacional em Matlab/Simulink de forma a simular os sistemas de alimentação de catenária a 1x25 kV e 2x25 kV. Para os diversos cenários será verificado e analisado o comportamento dos sistemas de alimentação da catenária quando circulam as cargas monofásicas de tração e eventuais desequilíbrios que a rede de tração possa originar na rede trifásica de transmissão de energia.

Palavras-chave: Tração Elétrica, Catenária, Energia, Subestação de Tração.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

In the electrical domain, it is considered that the energy supplied by an electrical system has quality when it guarantees the operation of the electrical equipment, without significant performance changes. Since the railway traction network is a unique system with large load variations and a marked shape, its operation depends on the correct dimensioning in order to suppress undesirable events.

The modes of operation and maintenance of traction substations and catenary stations are conducted in such a way so that this good functioning exists, there are no significant imbalances for the network, thus reducing anomalous occurrences, thereby increasing the life cycle of all the equipment constituting this type of facilities.

The present work has as main objective to characterize and compare the networks that feed electric traction vehicles from the substations to the locomotives in the national railway transmission network. For this purpose, a computational model in Matlab / Simulink will be developed in order to simulate the catenary supply systems at 1x25 kV and 2x25 kV. For the various scenarios, the behavior of the catenary supply systems will be verified and analyzed when the single-phase traction loads and any imbalances that the traction network may cause in the three-phase power transmission network.

Keywords: Electric Traction, Catenary, Energy, Traction Substation

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Agradecimentos

Ao Professor Luís Oliveira o meu agradecimento por toda a disponibilidade e orientação prestada, pelo apoio e compreensão que sempre manifestou. O meu sincero e profundo reconhecimento por tudo.

Aos meus pais por todos os sacrifícios que sempre fizeram, por acreditarem neste projeto e por se mostrarem sempre disponíveis a ajudar, aconselhar, ouvir e apoiar.

À mulher da minha vida, à minha irmã e minha sobrinha por acreditarem sempre em mim, não me deixarem desistir e estarem sempre presentes nos bons e maus momentos.

A todos os meus amigos que, de uma forma ou de outra, me apoiaram ao longo desta jornada.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Lista de Símbolos	xvii
Lista de Abreviaturas e Acrónimos	xix
Capítulo 1	
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ÂMBITO DO TRABALHO	1
1.2. MOTIVAÇÕES E PROPOSTA DE TRABALHO.....	1
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	2
Capítulo 2	
2. SISTEMAS DE TRACÇÃO ELÉTRICA	3
2.1. TRÂNSITO DE ENERGIA.....	3
2.2. SISTEMAS DE TRACÇÃO EM PORTUGAL.....	5
2.3. CATENÁRIA.....	5
2.3.1. ELEMENTOS DA CATENÁRIA	5
2.4. MONTAGENS DE CATENÁRIA.....	7
2.5. ESQUEMA LONGITUDINAL DE CATENÁRIA	8
2.6. POSTOS DE CATENÁRIA.....	8
Capítulo 3	
3. SUBESTAÇÕES DE TRACÇÃO	11
3.1. SISTEMA 1x25 kV.....	11
3.1.1. LIGAÇÃO BIFÁSICA.....	11
3.1.2. LIGAÇÃO TRIFÁSICA.....	13
3.2. SISTEMA 2x25 kV.....	14
3.3. DIFERENÇAS DE POTENCIAL E DESFASAMENTOS ENTRE SUBESTAÇÕES	17
3.4. IMPLEMENTAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES	19
3.5. EQUIPAMENTOS DAS SUBESTAÇÕES.....	20

Capítulo 4

4.	RETORNO DE CORRENTE DE TRACÇÃO	33
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA.....	33
4.2.	TIPOS DE SISTEMAS DE RCT.....	33
4.2.1.	SISTEMA TRADICIONAL	34
4.2.2.	SISTEMA COM CONDUTOR DE RETORNO	34
4.2.1.	SISTEMA COM AUTOTRANSFORMADORES	34
4.3.	SISTEMA CONTÍNUO DE RETORNO DE CORRENTE.....	35
4.4.	CABO DE TERRA ENTERRADO.....	35
4.5.	CABO DE TERRA AÉREO	36

Capítulo 5

5.	SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE TRACÇÃO ELÉTRICA.....	37
5.1.	TRÂNSITO DE ENERGIA.....	37
5.2.	MODELAÇÃO DO SISTEMA 1x25 kV	38
5.2.1.	CONFIGURAÇÃO DOS BLOCOS DE SIMULAÇÃO	39
5.2.1.1.	FONTE DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	39
5.2.1.2.	LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	39
5.2.1.3.	SUBESTAÇÃO DE TRACÇÃO	42
5.2.1.4.	SISTEMA DE TRACÇÃO	42
5.2.1.5.	CARGAS DE TRACÇÃO	44
5.2.1.6.	CARGAS.....	45
5.2.2.	SIMULAÇÃO DO SISTEMA 1x25 kV.....	46
5.2.2.1.	CENÁRIO 1	46
5.2.2.2.	CENÁRIO 2	48
5.2.2.3.	CENÁRIO 3	53
5.2.2.4.	CENÁRIO 4	57
5.3.	MODELAÇÃO DO SISTEMA 2x25 kV	59
5.3.1.	CONFIGURAÇÃO DOS BLOCOS DE SIMULAÇÃO	60
5.3.1.1.	FONTE DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	60
5.3.1.2.	LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	60
5.3.1.3.	SUBESTAÇÃO DE TRACÇÃO	63
5.3.1.4.	SISTEMA DE TRACÇÃO	64
5.3.1.5.	AUTOTRANSFORMADORES.....	66
5.3.1.6.	CARGAS DE TRACÇÃO	67
5.3.1.7.	CARGAS.....	68
5.3.2.	SIMULAÇÃO DO SISTEMA 2x25 kV.....	69
5.3.2.1.	CENÁRIO 1	69
5.3.2.2.	CENÁRIO 2	71
5.3.2.3.	CENÁRIO 3	76
5.3.2.4.	CENÁRIO 4	81

5.3.3.	DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES	82
5.4.	COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS	84
5.4.1.	SISTEMA 1x25 kV.....	84
5.4.2.	SISTEMA 2x25 kV.....	86
5.4.3.	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	87
Capítulo 6		
6.	CONCLUSÕES.....	89
6.1.	TRABALHO FUTURO	91
Referências	93
Glossário	97
Anexos	103

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Sistemas de tração elétrica	3
Figura 2.2 – Representação esquemática do trânsito de energia	4
Figura 2.3 – Cabo de suporte de catenária	6
Figura 2.4 – Fio de contacto de catenária.....	6
Figura 2.5 – Pêndulo de catenária	6
Figura 2.6 – Elementos de catenária	6
Figura 2.7 – Zona comum de catenárias.....	7
Figura 2.8 – Esquema longitudinal de catenária simplificado de uma via ferroviária	8
Figura 2.9 – Posto de catenária	9
Figura 2.10 – Esquema longitudinal de catenária de duas vias ferroviárias	10
Figura 3.1 – Princípio de ligação bifásica de um sistema 1x25kV AC.....	12
Figura 3.2 – Princípio de ligação trifásica de um sistema 1x25kV AC	13
Figura 3.3 – Princípio de ligação bifásica de um sistema 2x25kV AC.....	15
Figura 3.4 – Autotransformador de tração – diagrama e representação esquemática	15
Figura 3.5 – Distribuição de correntes num sistema 2x25kV AC.....	16
Figura 3.6 – Sistema de vetores do sistema trifásico.....	18
Figura 3.7 – Vista aérea da subestação de tração de Luzianes 1x25 kV AC	20
Figura 3.8 – Polo de seccionador	21
Figura 3.9 – Seccionador de duas posições	21
Figura 3.10 – Comando manual e Comando elétrico	21
Figura 3.11 – Disjuntor FXT9 da EFACEC e interruptor SDR 25 da Schneider	22
Figura 3.12 – Atuação de disjuntor por ordem da proteção	23
Figura 3.13 – Tipos de transformadores de corrente.....	23
Figura 3.14 – Tipos de transformadores de tensão.....	24
Figura 3.15 – Diagrama de TT indutivo.....	25
Figura 3.16 – Diagrama de TT capacitivo.....	25
Figura 3.17 – Representação esquemática e diagrama de um transformador monofásico	26
Figura 3.18 – Diagrama do transformador monofásico e transformador de tração 1x25 kV.....	27
Figura 3.19 – Transformador de 20 MVA 220/2x25 kV Siemens – SST Fatela	28
Figura 3.20 – Transformador de 12 MVA 150/27,5 kV Siemens – SST Luzianes.....	28
Figura 3.21 – Representação esquemática e diagrama de um transformador monofásico	29
Figura 3.22 – Diagrama e representação esquemática de um transformador de tração 2x25 kV.....	30
Figura 3.23 – Transformador de 12 MVA 150/27,5 kV com regulador de tomadas.	31

Figura 4.1 – Configurações de catenária nos sistemas ST, RT e AT	33
Figura 4.2 – Retorno da corrente de tração no sistema RT	34
Figura 4.3 – Retorno da corrente de tração no sistema AT	35
Figura 5.1 – Diagrama de rede para o sistema de 1x25 kV.....	37
Figura 5.2 – Diagrama de rede para o sistema de 2x25 kV.....	37
Figura 5.3 – Modelo de Matlab/Simulink para o sistema de 1x25 kV.....	38
Figura 5.4 – Bloco de simulação “Three-Phase Source – RL Branch”	39
Figura 5.5 – Bloco de simulação “Powergui – RLC Line Parameters Tool”	40
Figura 5.6 – Bloco de simulação “Distributed Parameters Line”.....	40
Figura 5.7 – Bloco de simulação “Powergui – RLC Line Parameters Tool”	41
Figura 5.8 – Bloco de simulação “Distributed Parameters Line”.....	41
Figura 5.9 – Bloco de simulação “Saturable Transformer”	42
Figura 5.10 – Modelação do sistema de transmissão de tração.....	43
Figura 5.11 – Bloco de simulação “Series RLC Branch”.....	43
Figura 5.12 – Bloco de simulação “Series RLC Load”.....	44
Figura 5.13 – Bloco de simulação “Three-Phase Series RLC Load”	45
Figura 5.14 – Tensões na geração (Barramento de Sines - B1) – Cenário 1.....	46
Figura 5.15 – Valor eficaz das tensões no primário e secundário da SST – Cenário 1	47
Figura 5.16 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Portimão – B3) – Cenário 1	47
Figura 5.17 – Correntes nos barramentos de Sines, Sabóia, Portimão e Luzianes – Cenário 1	48
Figura 5.18 – Simulação do sistema de 1x25 kV com uma carga móvel – Cenário 2	49
Figura 5.19 – Tensões na geração (Barramento de Sines - B1) – Cenário 2.....	49
Figura 5.20 – Correntes no barramento de Luzianes (B4) – Cenário 2.....	50
Figura 5.21 – Correntes no barramento de Luzianes (B4) – Pormenor – Cenário 2	50
Figura 5.22 – Tensão no primário e secundário da SST e pantógrafo do comboio – Cenário 2	51
Figura 5.23 – Correntes no primário e secundário da SST – Cenário 2.....	52
Figura 5.24 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Portimão – B3) – Cenário 2	52
Figura 5.25 – Simulação do sistema de 1x25 kV com duas cargas móveis – Cenário 3.....	53
Figura 5.26 – Tensões na geração (Barramento de Sines - B1) – Cenário 3.....	54
Figura 5.27 – Tensões no primário e secundário da SST e pantógrafos dos comboios – Cenário 3... 55	55
Figura 5.28 – Correntes no primário e secundário da SST – Cenário 3.....	55
Figura 5.29 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Portimão – B3) – Cenário 3	57
Figura 5.30 – Curto-circuito catenária-carril de 30ms, 50ms e 180ms – Cenário 4.....	58
Figura 5.31 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Portimão – B3) – Cenário 4	58
Figura 5.32 – Modelo de Matlab/Simulink para o sistema de 2x25 kV.....	59
Figura 5.33 – Bloco de simulação “Three-Phase Source – RL Branch”	60
Figura 5.34 – Bloco de simulação “Powergui – RLC Line Parameters Tool”	61
Figura 5.35 – Bloco de simulação “Powergui – RLC Line Parameters Tool”	61
Figura 5.36 – Bloco de simulação “Distributed Parameters Line”	62
Figura 5.37 – Bloco de simulação “Powergui – RLC Line Parameters Tool”	62
Figura 5.38 – Bloco de simulação “Distributed Parameters Line”	63
Figura 5.39 – Bloco de simulação “Saturable Transformer”.	64
Figura 5.40 – Modelação do sistema de transmissão de tração.....	65

Figura 5.41 – Bloco de simulação “Series RLC Branch”	65
Figura 5.42 – Bloco de simulação “Saturable Transformer”	66
Figura 5.43 – Bloco de simulação “Series RLC Load”	67
Figura 5.44 – Bloco de simulação “Three-Phase Series RLC Load”	68
Figura 5.45 – Tensões na geração (Barramento do Pocinho – B1) – Cenário 1	69
Figura 5.46 – Tensões no primário e secundário da SST – Cenário 1	70
Figura 5.47 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Ferro – B3) – Cenário 1	70
Figura 5.48 – Simulação do sistema de 2x25 kV com uma carga móvel – Cenário 2	71
Figura 5.49 – Tensões na geração (Barramento do Pocinho - B1) – Cenário 2	72
Figura 5.50 – Correntes no barramento de Fatela (B4) – Cenário 2	72
Figura 5.51 – Correntes no barramento de Fatela (B4) – Pormenor – Cenário 2.....	73
Figura 5.52 – Tensões no primário e secundário da SST e pantógrafo da locomotiva – Cenário 2....	75
Figura 5.53 – Correntes no primário e secundário da SST e carga – Cenário 2	75
Figura 5.54 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Ferro – B3) – Cenário 2	76
Figura 5.55 – Tensões na geração – Cenário 3.....	77
Figura 5.56 – Tensões no primário e secundário da SST e pantógrafos – Cenário 3.....	79
Figura 5.57 – Correntes no primário e secundário da SST – Cenário 3	79
Figura 5.58 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Ferro – B3) – Cenário 3	80
Figura 5.59 – Curto-circuito catenária-carril de 30ms e 180ms – Cenário 4	81
Figura 5.60 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Ferro – B3) – Cenário 4	82
Figura 5.61 – Distribuição de correntes no sistema 2x25kV AC (Cenário 5).....	83
Figura 5.62 – Distribuição de correntes no sistema 2x25kV AC (Cenário 6).....	83
Figura 5.63 – Distribuição de correntes no sistema 2x25kV AC (Cenário 7).....	83
Figura 5.64 – Modelo do sistema 1x25 kV	84
Figura 5.65 – Coeficientes de desequilíbrio - Sistema 1x25 kV	85
Figura 5.66 – Modelo do sistema 2x25 kV	86
Figura 5.67 – Coeficientes de desequilíbrio - Sistema 2x25 kV	87

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Subestações de tração 1x25kV AC	12
Tabela 2 – Subestações de tração 2x25kV AC	14
Tabela 3 – Possibilidades de diferenças de potencial	17
Tabela 4 – Diferenças de potencial possíveis entre setores	17
Tabela 5 – Regimes de carga dos transformadores de tração	32
Tabela 6 – Tensões e correntes no primário e secundário da SST – Cenário 2 – 1x25 kV.....	51
Tabela 7 – Tensões e correntes no primário e secundário da SST – Cenário 3 – 1x25 kV.....	56
Tabela 8 – Tensões e correntes no primário e secundário da SST – Cenário 2 – 2x25 kV.....	74
Tabela 9 – Tensões e correntes no primário e secundário da SST – Cenário 3 – 2x25 kV.....	78
Tabela 10 – Resultados da simulação do sistema 1x25 kV.....	85
Tabela 11 – Resultados da simulação do sistema 2x25 kV.....	86
Tabela 12 – Comparação de resultados de tensões	88
Tabela 13 – Comparação de resultados de coeficientes de desequilíbrio.....	88

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de Símbolos

f	Frequência nominal da rede (Hz)
L_L	Indutância da linha de transmissão (H/km)
N_s	Número de espiras no secundário do transformador
N_p	Número de espiras no primário do transformador
P	Potência ativa (W)
Q	Potência reativa (var)
R_{Falha}	Resistência de defeito (Ω)
R_L	Resistência da linha de transmissão (Ω /km)
S_{cc}	Potência aparente de curto-circuito (VA)
S	Potência aparente (VA)
U_0, U_4, U_8	Tensões simples do sistema trifásico (V)
U_c	Tensão na catenária (V)
U_f	Tensão no feeder (V)
U_p	Tensão no primário do transformador (V)
U_s	Tensão no secundário do transformador (V)
V_n	Tensão nominal (V)
V_{n1}	Tensão nominal no enrolamento do primário do transformador (V)
V_{n2}	Tensão nominal no enrolamento do secundário do transformador (V)
V_{n3F}	Tensão nominal trifásica (V)
Z_C	Impedância da catenária (Ω /km)
Z_F	Impedância do feeder (Ω /km)
Z_R	Impedância do carril (Ω /km)

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Lista de Abreviaturas e Acrónimos

AC	Corrente alternada (de Alternating Current)
AT	Alta tensão
AT	Sistema com autotransformadores de tração
B	Posto de catenária de barramento
BT	Baixa tensão
CdTA	Cabo de terra aéreo
CdTE	Cabo de terra enterrado
CS	Cabo de suporte
DC	Corrente contínua (de Direct Current)
DDP	Diferença de potencial
EDP	Energias de Portugal
EN	Norma Europeia (de European Norm)
FC	Fio de contacto
GIS	Equipamento com isolamento de gás (de Gas Insulated Switchgear)
IFTE	Instalações fixas para tração eléctrica
IP	Infraestruturas de Portugal
MAT	Muito alta tensão
MT	Média tensão
P	Pêndulo
PX	Posto de catenária auxiliar
R	Posto de catenária de ramal
RCT	Retorno de corrente de tração
RCT+TP	Retorno de corrente de tração e terras de protecção
REN	Rede eléctrica nacional
RFN	Rede ferroviária nacional
RNT	Rede nacional de transporte

RT	Sistema com condutor de retorno
SE	Secção elementar
SF6	Hexafluoreto de enxofre
SLA	Seccionamento de lâmina de ar
SST	Subestação de tração
SP	Posto de catenária de seccionamento e paralelo
SS	Posto de catenária de subseccionamento
SSP	Posto de catenária de subseccionamento e paralelo
ST	Sistema tradicional (de standard)
TA	Transformador de alimentação
TI	Transformador de medida de intensidade
TP	Transformador de potência
TT	Transformador de medida de tensão
UQE	Unidades quádruplas elétricas
UTE	Unidades triplas elétricas
ZC	Zona comum
ZN	Zona neutra

1. INTRODUÇÃO

A tração elétrica é uma forma de utilização de energia que aproveita a capacidade de transformação de energia elétrica em energia mecânica para promover o deslocamento das unidades motoras elétricas. A aplicação da eletricidade na tração apareceu no ano de 1879 na Alemanha, logo nos primórdios da exploração industrial por Werner von Siemens [1]. Em Portugal, a 15 de agosto de 1926 foi inaugurado o serviço de tração elétrica na linha de Cascais com recurso a subestações de tração de 1500 V em corrente contínua aplicados à catenária. Atualmente o sistema ferroviário nacional utiliza dois tipos de alimentação em corrente alternada, o circuito simples com tensão de 25 kV e o circuito duplo com 2x25 kV [2]. O comboio constitui um meio de transporte terrestre económico e ecologicamente sustentável, sendo a construção de redes de alta velocidade uma das prioridades para melhorar a conectividade entre regiões. Torna-se assim essencial efetuar uma análise ao comportamento dos sistemas de tração e desequilíbrios causados na rede trifásica de transmissão de energia.

1.1. ÂMBITO DO TRABALHO

Este trabalho insere-se na disciplina de dissertação do Mestrado em Engenharia Elétrica e Eletrónica na Especialidade em Sistemas de Energia e Controlo do Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve, no ano letivo de 2019/2020 com vista à obtenção do grau de Mestre.

1.2. MOTIVAÇÕES E PROPOSTA DE TRABALHO

Na Infraestruturas de Portugal (IP), a rede ferroviária está dividida em quatro grandes áreas: sinalização ferroviária, catenária, via e baixa tensão. Pelo facto de atualmente trabalhar na área da sinalização ferroviária no sul do país, quis alargar os meus conhecimentos, propondo o estudo na área da catenária. Existem diversas referências científicas sobre tração elétrica aplicadas aos mais diversos equipamentos dos sistemas de energia elétrica, principalmente sobre sistemas de corrente contínua, contudo, é difícil de encontrar literatura que estude de forma integrada, os atuais sistemas de alimentação de tração elétrica em corrente alternada [3].

Deste modo, com base na minha motivação, documentos pesquisados e através dos conhecimentos adquiridos nas disciplinas do ano transato procurei preencher esta lacuna e contribuir para o estudo do comportamento das redes de alimentação dos veículos de tração elétrica em corrente alternada. O principal objetivo a atingir é caracterizar e comparar os sistemas de alimentação de catenária de corrente alternada a 1x25 kV e 2x25 kV na rede de transmissão ferroviária nacional, através da modelação e simulação computacional em Matlab/Simulink dos sistemas de alimentação de catenária a 1x25 kV e 2x25 kV. Para o efeito será realizado um estudo breve e introdutório sobre os equipamentos de catenária, subestações de tração e tipos de ligação nos sistemas 1x25 kV e 2x25 kV, bem como a caracterização dos sistemas de retorno de corrente de tração.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação pretende relatar o trabalho desenvolvido, enquadrá-lo nos atuais sistemas de tração elétrica, apresentar resultados e conclusões do mesmo. Este documento está organizado em seis capítulos, sendo o presente uma descrição do âmbito, motivações e objetivo do trabalho.

O **Capítulo 2** faz uma abordagem ao sistema de tração elétrica, descreve o conceito de catenária, zona neutra e suas características, descreve de forma sucinta o esquema longitudinal de catenária e apresenta os tipos de postos de catenária existentes na ferrovia.

O **Capítulo 3** faz uma descrição das subestações de tração, dos sistemas de alimentação, das diferenças de potencial e defasamentos entre subestações de tração e por último descreve a implementação das subestações de tração e os seus principais equipamentos.

O **Capítulo 4** faz uma descrição sucinta do sistema de retorno de corrente de tração, descrevendo os tipos de sistemas existentes bem como os principais elementos.

O **Capítulo 5** faz uma análise à modelação e simulação computacional das redes de alimentação de tração elétrica a 1x25 kV e 2x25 kV e descreve as análises efetuadas aos sistemas da rede de tração.

O **Capítulo 6** congrega as principais conclusões da tese e considerações finais.

2. SISTEMAS DE TRACÇÃO ELÉTRICA

Os sistemas de tração elétrica englobam as instalações móveis e as instalações fixas de tração elétrica (IFTE) conforme representado na Figura 2.1. As instalações móveis incluem as unidades motoras elétricas (locomotivas, unidades triplas elétricas (UTE) e as unidades quádruplas elétricas (UQE)) que captam por intermédio de pantógrafos a energia necessária ao seu movimento. As IFTE englobam o sistema de catenária, os postos de catenária, as subestações de tração (SST) e o sistema de retorno de corrente de tração (RCT) [4].

2.1. TRÂNSITO DE ENERGIA

O trânsito de energia num sistema de tração elétrica ferroviária, conforme representado na Figura 2.2, envolve dois subsistemas, o sistema da rede de produção, transporte e distribuição de energia pertencente à Rede Elétrica Nacional (REN) e/ou às Energias de Portugal (EDP) e o sistema da rede de tração elétrica pertencente à IP. A SST deve ser projetada de forma compatível com a rede de transporte e distribuição a montante com o intuito de fornecer a alimentação elétrica à rede ferroviária, assegurando o definido nos padrões de qualidade de fornecimento de energia, conforme a norma EN 50163 [5].

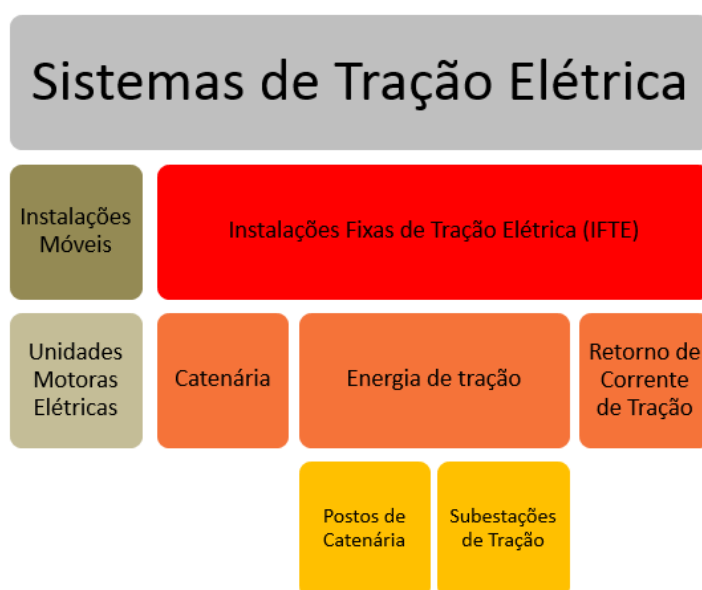


Figura 2.1 – Sistemas de tração elétrica.

As características do sistema da rede de produção, transporte e distribuição de energia, conforme representado na parte superior da Figura 2.2, podem definir-se da seguinte forma:

- A **rede de energia elétrica** é constituída por linhas de transmissão em muito alta tensão (MAT) concessionada pela REN (150 kV, 220 kV e 400 kV) e linhas de distribuição de alta tensão (AT), média tensão (MT) e baixa tensão (BT) concessionadas pela EDP (AT - 63 kV, MT – 10 kV, 15 kV, 30 kV e BT – 230V e 400V). No anexo I encontra-se o mapa da rede nacional de transporte (RNT) de eletricidade, onde constam todas as linhas mencionadas anteriormente.

As características do sistema da rede de tração, conforme representado na parte inferior da Figura 2.2, podem definir-se da seguinte forma:

- As **subestações de tração**, descritas em maior detalhe no capítulo 3, são instalações elétricas cuja principal função é adaptar as características da tensão da rede alimentação às características necessárias ao fornecimento de energia elétrica ao material circulante através da catenária [6];
- A **catenária**, descrita em maior detalhe secção 3 deste capítulo, é o sistema de transporte de energia elétrica de tração de circulações ferroviárias, que inclui linhas aéreas formadas por um ou mais fios de contacto e um ou mais condutores longitudinais que, suportando mecanicamente aqueles, têm também função de transporte de energia elétrica [7];
- O **sistema de retorno de corrente de tração**, tema que será abordado no capítulo 4, representa um conjunto de condutores longitudinais à via, com ligações transversais regulares, que, em conjunto com um ou os dois carris, garantem um caminho seguro para a corrente de tração entre os comboios e a subestação de tração [6];

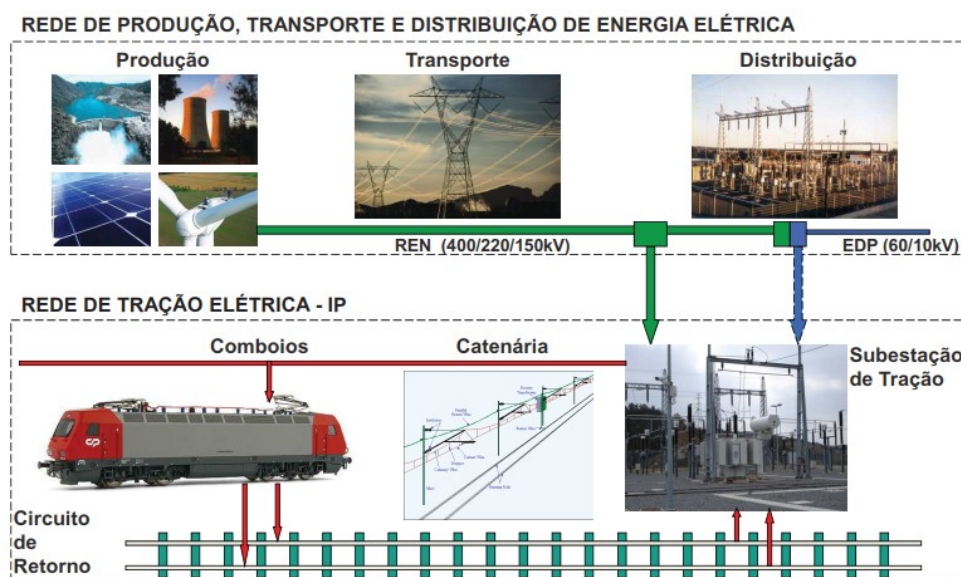


Figura 2.2 – Representação esquemática do trânsito de energia [2].

- A **carga** é o elemento ou conjunto de elementos (instalações móveis) do circuito elétrico que consome energia elétrica para executar a sua função [4], [6].

2.2. SISTEMAS DE TRAÇÃO EM PORTUGAL

Em Portugal, os sistemas de tração elétrica são divididos em sistemas de corrente contínua e de corrente alternada. Oitenta e nove por cento da rede ferroviária, nomeadamente a linha do Norte, linha do Sul, linha do Algarve entre outras estão eletrificadas em corrente alternada, 1x25 kV, 50 Hz, alimentadas pela rede elétrica nacional a 63, 150 e 220 kV. A linha de Cascais, que representa apenas 2% da rede ferroviária, está eletrificada em corrente contínua com uma tensão de alimentação da catenária de 1500 V. A linha da Beira Alta e parte da linha da Beira Baixa, estão eletrificadas em corrente alternada a partir de subestações de tração com o sistema 2x25 kV, 50 Hz alimentadas pela rede elétrica nacional a 220 kV [2], [8]. Nos anexos II, III e IV encontram-se os mapas das linhas e ramais da rede ferroviária Portuguesa, das subestações de tração elétrica e dos troços de linha eletrificada com as características mencionadas anteriormente.

2.3. CATENÁRIA

A catenária, é o sistema de transporte de energia elétrica de tração de circulações ferroviárias, que inclui linhas aéreas formadas por um ou mais fios de contacto e um ou mais condutores longitudinais que, suportando mecanicamente aqueles, têm também função de transporte de energia elétrica [7]. É a partir do fio de contacto que os pantógrafos das unidades motoras fazem a captação da corrente elétrica [4], [9]. Devido à elevada potência que necessitam as locomotivas, é necessário encontrar um compromisso entre a tensão de alimentação da catenária e a tensão nominal das locomotivas para minimizar as perdas na catenária. A rede de tração elétrica em Portugal é constituída maioritariamente por dois sistemas distintos, 1x25 kV e 2x25 kV [8].

2.3.1. ELEMENTOS DA CATENÁRIA

A catenária, é constituída por três componentes fundamentais sendo eles o cabo de suporte (CS), fio de contacto (FC) e pêndulos (P): O **cabo de suporte** de catenária, representado na Figura 2.3 e Figura 2.6 -VIII, tem como função suportar o peso do fio de contato, dos pêndulos e dos equipamentos montados nos vãos de catenária. O CS é constituído por fios de bronze e tem uma secção de 65 mm² [9], [10]; O **fio de contacto**, representado na Figura 2.4 e Figura 2.6 -VI, tem como função fornecer energia elétrica ao comboio através do contacto do pantógrafo.

O FC é constituído por um cilindro em cobre duro, apresenta uma secção de 107 mm² comportando duas ranhuras longitudinais destinadas à fixação das garras de aperto (griffes) para pêndulos deixando sem entraves para a viagem do pantógrafo sob ele [9]- [11]; O **pêndulo**, representado na Figura 2.5 e Figura 2.6 -VII, tem como função suspender o FC e o CS. Apresenta uma secção de 12 mm² e é constituído em bronze e contém um terminal de olhal em cada extremidade sendo o seu comprimento variável [9], [11]. Os componentes da catenária referidos anteriormente, conjuntamente com diversos elementos elétricos e mecânicos representam todos os elementos constituintes da catenária nas IFTE. Os restantes elementos que constituem a catenária, explicados adiante, podem ser observados na Figura 2.6 e são os seguintes: feeder (I), isolador (II), suspensões de catenária (III), cabo de terra aéreo (IV) e apoios de catenária (V).



Figura 2.3 – Cabo de suporte de catenária [9].



Figura 2.4 – Fio de contacto de catenária [9].



Figura 2.5 – Pêndulo de catenária [9].

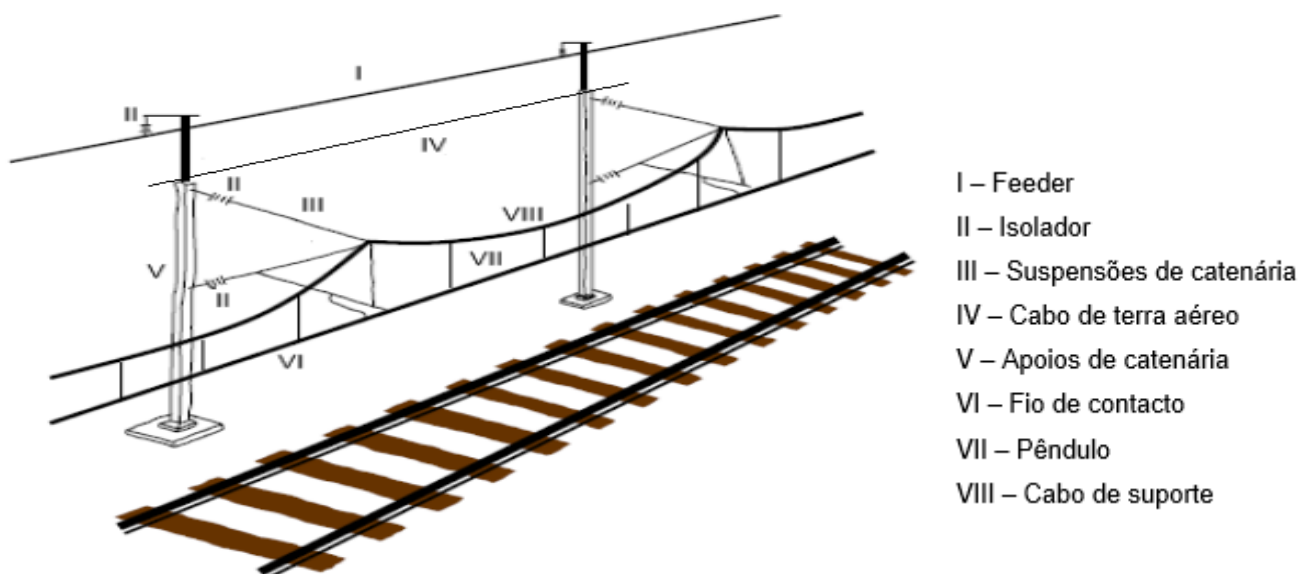


Figura 2.6 – Elementos de catenária (adaptado de [12]).

2.4. MONTAGENS DE CATENÁRIA

Em função da velocidade, o sistema de catenária deve (i) garantir um bom comportamento dinâmico no interface pantógrafo-catenária mantendo os componentes em contacto permanente independentemente da velocidade, (ii) resistir às solicitações mecânicas e (iii) assegurar a correta capacidade de corrente. O fio de contacto tem de ser montado com o desalinhamento adequado à geometria da via e ao pantógrafo de forma a proporcionar um desgaste constante na escova do pantógrafo [9]. Nas montagens da catenária, existem separações mecânicas e separações elétricas de catenária conforme se descreve de seguida.

A **separação mecânica** entre lanços de catenária, permite que os pantógrafos transponham o lanço de catenária seguinte sem existir restrições, garantindo, no entanto, a continuidade elétrica entre os fios de contacto através, conforme ilustrado na Figura 2.7, das chamadas **zonas comuns (ZC)**. As catenárias de dois lanços consecutivos são montadas lado a lado a uma distância de 200 mm, tendo um comprimento máximo de 1400 m, sendo estes, troços mecanicamente independentes, cuja força tensora aplicada é constante com variação da temperatura.

Por motivos de exploração, a catenária está dividida eletricamente em troços mais pequenos chamados de **secções elementares (SE)**. A **separação elétrica** entre duas SE é realizada através das chamadas **zonas neutras (ZN)**. Uma zona neutra é uma pequena extensão de catenária (cerca de 30 metros) não alimentada eletricamente sendo construída de tal forma que permita a passagem de todos os pantógrafos das unidades motoras sem qualquer imposição de ordem mecânica, apenas a obrigatoriedade de desligar o disjuntor da unidade motora, para que não se estabeleça um arco elétrico entre a zona alimentada e a ZN. Por regra, a cada SST encontra-se associada uma ZN e entre duas SST contíguas, existe sempre uma ZN de forma que se faça a separação elétrica entre duas catenárias com diferença de potencial (DDP) diferentes. De referir ainda, que em cada uma das extremidades da zona neutra existe uma zona comum sendo que, nestas zonas comuns, cada pantógrafo toca simultaneamente em duas catenárias, sendo uma a da zona neutra [2], [4], [8], [13] e [14].

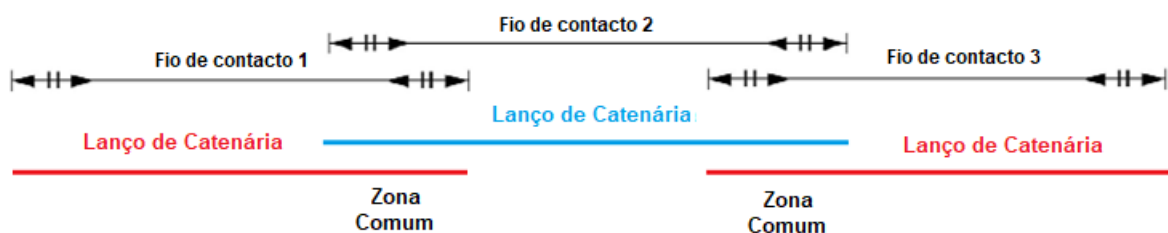


Figura 2.7 – Zona comum de catenárias.

2.5. ESQUEMA LONGITUDINAL DE CATENÁRIA

Na Figura 2.8 são representados de forma simplificada, os elementos constituintes de um esquema longitudinal de catenária de uma via ferroviária, nomeadamente indicação de uma zona neutra, de uma subestação de tração, de três secções elementares e dois postos de catenária. As secções elementares são identificadas nos esquemas longitudinais de catenária da seguinte forma:

- Cada secção elementar tem um número que é único no setor;
- Os números ímpares correspondem a secções elementares nas vias de sentido ascendente (sentido crescente da quilometragem);
- Os números pares correspondem a secções elementares nas vias de sentido descendente (sentido decrescente da quilometragem).

De igual modo, está representado na Figura 2.8, um **setor** e um **subsetor** de catenária. Um setor, é o troço de catenária compreendida entre uma SST e uma ZN ou entre uma SST e o fim de linha eletrificada. Nas SST existe um sector para norte e outro para sul e de uma forma geral, a cada via está associado um setor. Um subsetor de catenária, é o troço compreendido entre dois postos de catenária consecutivos ou entre uma SST e o posto de catenária adjacente ou ainda entre um posto de catenária e o fim de linha eletrificada [4], [12]. Através da leitura dos esquemas longitudinais consegue-se identificar diversos elementos constituintes da catenária explicados no presente capítulo.

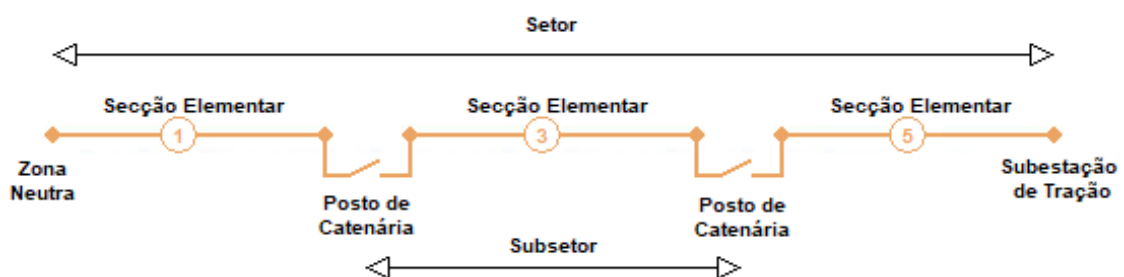


Figura 2.8 – Esquema longitudinal de catenária simplificado de uma via ferroviária.

2.6. POSTOS DE CATENÁRIA

Os postos de catenária, conforme exemplo da Figura 2.9, são instalações fixas existentes junto à via-férrea eletrificada que têm como função assegurar a continuidade elétrica longitudinal (ao longo da catenária) e de paralelo transversal (entre catenárias), permitem cortar ou restabelecer a tensão de troços de catenária por razões de exploração e/ou manutenção e permitem identificar as secções elementares com falta de tensão [9].

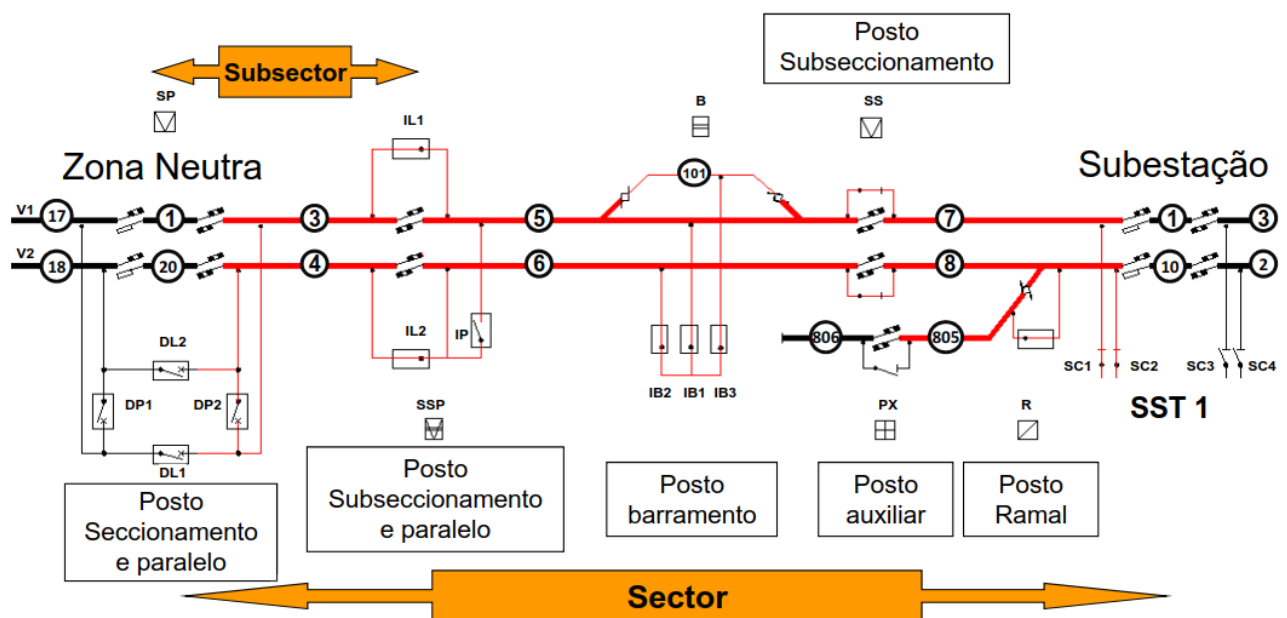
Os postos de catenária, representados no esquema longitudinal de catenária da Figura 2.10, cuja aparelhagem (interruptores ou disjuntores) é sempre telecomandada a partir do posto de telecomando, podem classificar-se segundo as suas funções em:

- **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 [4];
- **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 [4];
- **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 [4];
- **Postos de barramento (B)** – São postos onde várias secções elementares são ligadas a um barramento através de interruptores. Em bifurcações ou em entroncamentos permitem realizar as operações de paralelo transversal e alimentação de linhas desviadas, realizando por vezes também a operação de continuidade longitudinal [4];



Figura 2.9 – Posto de catenária [9].

- **Postos de ramal (R)** – 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 [4];
- **Postos auxiliares (PX)** – 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 [4].



Descrição dos elementos presentes no esquema longitudinal de catenária

Secções elementares nas vias de sentido ascendente: SE 17, SE 1, SE 3, SE 5, SE 7, SE 1 e SE 3
 Secções elementares nas vias de sentido descendente: SE 18, SE 20, SE 4, SE 6, SE 8, SE 10 e SE 2
 Secções elementares na linha de resguardo: SE 806 e SE 805
 Secções elementares na linha desviada na estação: SE 101

Equipamentos de manobra:

- No posto de catenária SP: disjuntores de continuidade longitudinal (DL1 e DL2) e disjuntores de paralelo transversal (DP1 e DP2);
- No posto de catenária SSP: interruptores de continuidade longitudinal (IL1 e IL2) e interruptor de paralelo transversal (IP);
- No posto de catenária B: interruptores de paralelo transversal e linha desviada (IB1, IB2 e IB3);
- Na subestação de tração: seccionadores de catenária (SC1, SC2, SC3 e SC4).

Figura 2.10 – Esquema longitudinal de catenária de duas vias ferroviárias (adaptado de [2]).

3. SUBESTAÇÕES DE TRAÇÃO

A alimentação das catenárias, é realizada a partir de SST, 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-as em 25 kV [4]. As subestações que alimentam os sistemas 1x25 kV e 2x25 kV possuem diferentes tipologias e conseqüentemente modos de exploração diferentes, dependendo da alimentação disponibilizada pelo fornecedor de energia e do modo de ligação dos transformadores de potência. As SST no sistema 25 kV a 50 Hz são alimentadas com tensões primárias entre 63 a 220 kV e com potências instaladas compreendidas entre 10 a 32 MVA. A escolha do nível de tensão depende essencialmente da potência a contratar e da potência de curto-circuito disponibilizada pelo fornecedor. À entrada das SST podemos ter dois tipos de alimentação: alimentação bifásica ou alimentação trifásica, sendo mais usual a alimentação bifásica. Um dos principais problemas colocados pelas subestações de tração à rede fornecedora de energia é o desequilíbrio provocado pelas cargas monofásicas de tração (comboio) à rede trifásica de alimentação [2], [8] e [12]. Nos anexos III e IV encontram-se os mapas das subestações de tração e troços de linha eletrificada.

3.1. SISTEMA 1x25 kV

O sistema de alimentação a 25 kV monofásico é o mais usado nos sistemas elétricos de tração da rede ferroviária nacional (RFN), cuja designação convencional é 1x25 kV. Neste sistema, o primário do transformador monofásico de potência utiliza apenas duas das três fases da rede de alimentação, apresentando o secundário uma tensão aos seus terminais de 25 kV. Um dos terminais do secundário é ligado à terra e ao sistema de retorno da corrente de tração e o outro à catenária [2]. Atualmente este sistema alimenta uma extensão de aproximadamente 1210 km de comprimento, existindo 18 subestações distanciadas entre si aproximadamente de 60 km, identificadas na tabela 1.

3.1.1. LIGAÇÃO BIFÁSICA

Nos sistemas 1x25 kV, o esquema de montagem que mais se utiliza é a de ligação bifásica. Nas SST com ligação bifásica, conforme representado na Figura 3.1, existem normalmente dois transformadores de potência alimentados pelas mesmas duas fases, funcionando um em carga e outro em reserva.

Neste caso, não é obrigatório a existência de uma ZN junto à SST para a separação de fases. No entanto, em certos casos, existe uma ZN para facilitar a exploração da rede ou permitir a utilização dos dois transformadores de potência em simultâneo, quando os encravamentos o permitirem. Caso exista ZN, o desfasamento entre tensões secundárias será de 0°, equivalente a uma diferença de potencial de 0 kV entre elas.

Tabela 1 – Subestações de tração 1x25kV AC (adaptado de [2]).

LINHA	SUBESTAÇÃO	ALIMENTAÇÃO	TIPO DE LIGAÇÃO DOS TRANSFORMADORES	POTÊNCIA INSTALADA (MVA)
MINHO	TRAVAGEM	TRIFÁSICA 63 kV	“V”	32
DOURO	IRIVO	BIFÁSICA 220 kV	BIFÁSICA	20
NORTE	V.F. XIRA	TRIFÁSICA 63 kV	“V”	32
	ENTRONCAMENTO	TRIFÁSICA 63 kV	“V”	20
	LITÉM	BIFÁSICA 63 kV	BIFÁSICA	10
	ALFARELOS	TRIFÁSICA 63 kV	“V”	32
	SALREU	TRIFÁSICA 63 kV	“V”	32
BEIRA BAIXA	ABRANTES	BIFÁSICA 63 kV	BIFÁSICA	10
	RÓDÃO	BIFÁSICA 150 kV	BIFÁSICA	16,2
SINTRA	AMADORA	BIFÁSICA 63 kV	BIFÁSICA	32
VENDAS NOVAS	QUINTA GRANDE	BIFÁSICA 150 kV	BIFÁSICA	16,2
SINES	SANTIAGO DO CACÉM	BIFÁSICA 63 kV	BIFÁSICA	12
ALENTEJO	PEGÕES	TRIFÁSICA 150 kV	BIFÁSICA	16,2
SUL	FOGUETEIRO	BIFÁSICA 150 kV	BIFÁSICA	20
	MONTE NOVO PALMA	BIFÁSICA 150 kV	BIFÁSICA	12
	ERMIDAS DO SADO	BIFÁSICA 150 kV	BIFÁSICA	12
	LUZIANES	BIFÁSICA 150 kV	BIFÁSICA	12
	TUNES	BIFÁSICA 63 kV	BIFÁSICA	12

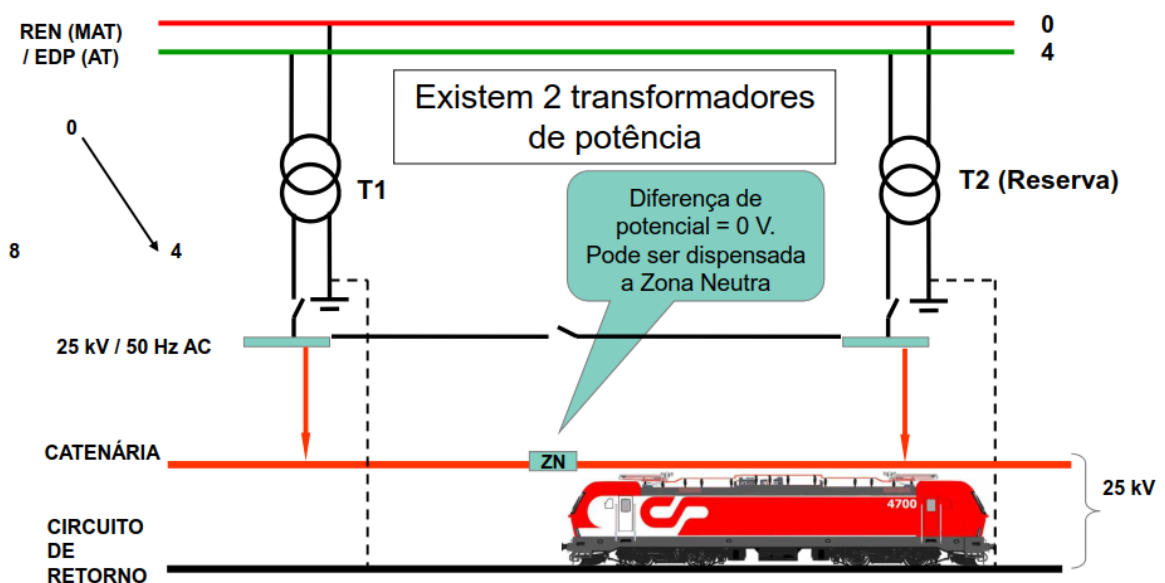


Figura 3.1 – Princípio de ligação bifásica de um sistema 1x25kV AC (adaptado de [2]).

A montagem bifásica é a que introduz maiores desequilíbrios nas redes de alimentação trifásicas do distribuidor de energia estando a escolha das fases de alimentação normalmente associada aos desequilíbrios já existentes na rede de alimentação. Este desequilíbrio é de igual modo minimizado através da alternância de fases entre SST, ou seja, uma SST ‘A’ utiliza as fases (U0 e U4)¹, a SST ‘B’ utiliza as fases (U0 e U8)¹, a SST ‘C’ utiliza as fases (U4 e U8)¹ e assim sucessivamente. Esta alternância exige o estabelecimento de zonas neutras na catenária, entre SST, para evitar o curto-circuito entre fases diferentes [2], [8] e [15].

3.1.2. LIGAÇÃO TRIFÁSICA

Neste tipo de alimentação, as SST trifásicas são alimentadas a uma tensão de 1x25 kV sendo as três fases desfasadas de 120°. Conforme ilustrado na Figura 3.2, estas SST possuem três transformadores de potência, em que dois funcionam em ligação “V” e o terceiro funciona como reserva que pode substituir qualquer um dos dois. Na ligação em “V” cada transformador é alimentado por duas fases, sendo uma das fases, comum aos dois transformadores, daí a designação em “V”. Nesta tipologia de ligação, é obrigatório a existência de uma ZN entre cada setor sendo que cada transformador alimenta um setor de catenária e pode funcionar independentemente do outro estar ou não ao serviço. Com esta ligação procura-se um menor desequilíbrio na rede primária comparativamente ao provocado pela ligação bifásica. Na RFN, conforme referenciado na tabela 1, existem cinco SST com a configuração em trifásica em “V” [2], [8].

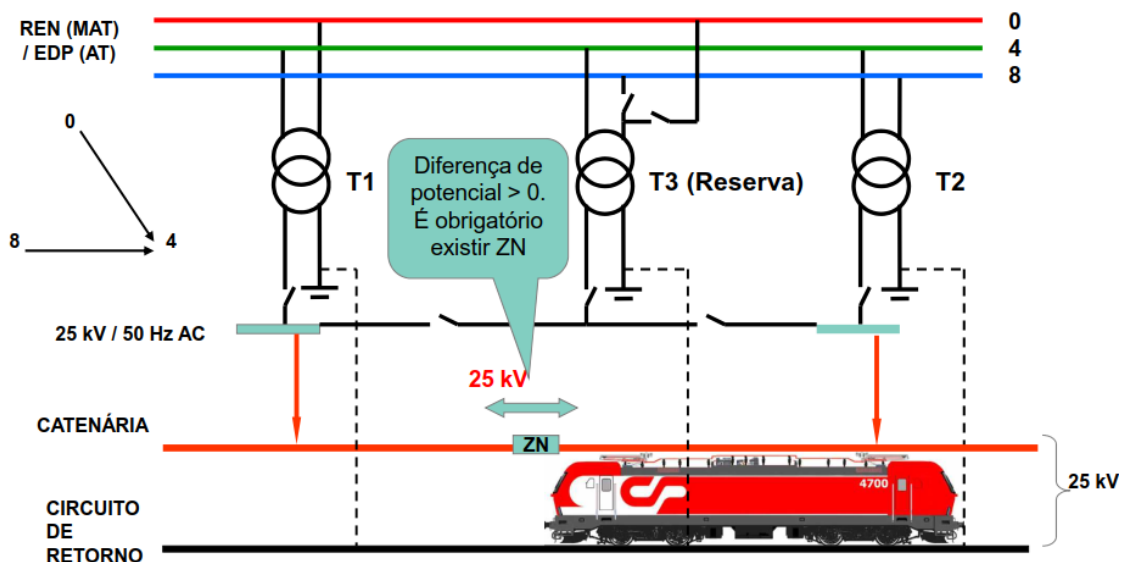


Figura 3.2 – Princípio de ligação trifásica de um sistema 1x25kV AC (adaptado de [2]).

¹ - Nos sistemas de energia de tração, ao invés da utilização da nomenclatura RST ou fase 1, fase 2, fase 3, para cada uma das fases de alimentação, é utilizada a designação de U0, U4 e U8, similar ao de um índice horário, conforme referenciado na secção 3.3.

3.2. SISTEMA 2x25 kV

O sistema de alimentação 2x25 kV encontra-se instalado na linha da Beira Alta desde 1997 e na linha da Beira Baixa desde 2008. Este sistema é implementado quando há escassez de pontos de alimentação, quando as fontes de fornecimento de energia da rede primária se encontram a grandes distâncias ou na implementação de linhas de alta velocidade. Este sistema permite que haja um maior espaçamento entre SST e que se obtenha uma redução das perdas elétricas na rede de tração uma vez que a alimentação se efetua a 50 kV [2]. Atualmente este sistema alimenta uma extensão de aproximadamente 260 km de comprimento, existindo 4 subestações de tração ligadas à rede nacional de transporte a 220 kV, identificadas na tabela 2.

Conforme ilustrado na Figura 3.3, à entrada de cada subestação temos duas linhas bifásicas em MAT a 220 kV, possuindo cada SST normalmente dois transformadores de potência com relação 220/2x25 kV. Estes transformadores de potência possuem um ponto médio no enrolamento secundário com uma tensão secundária de 50 kV, cujos terminais são ligados um à catenária e outro ao feeder. O ponto médio do enrolamento secundário do transformador, é ligado ao carril, de modo a permitir o funcionamento das unidades motoras que utilizam um nível de tensão de 25 kV. Ao longo da linha de catenária, é instalado outro condutor denominado por feeder negativo (que apresenta uma diferença de potencial de -25 kV em relação à terra e de 50 kV em relação à catenária), ou seja, a tensão primária de cada autotransformador de tração é de 50 kV. O autotransformador de tração distingue-se dos transformadores por apenas ter enrolamento primário e não ter enrolamento secundário sendo a tensão secundária obtida a partir de uma tomada intermédia fixa. Neste sistema, os autotransformadores são utilizados para interligar a catenária, o feeder negativo e o sistema de RCT, conforme se observa na Figura 3.4 [2], [6].

Tabela 2 – Subestações de tração 2x25kV AC (adaptado de [2]).

LINHA	SUBESTAÇÃO	ALIMENTAÇÃO	TIPO DE LIGAÇÃO DOS TRANSFORMADORES	POTÊNCIA INSTALADA (MVA)
BEIRA ALTA	MORTÁGUA	BIFÁSICA 220 kV	BIFÁSICA 2X25 kV	16,2
	GOUVEIA	BIFÁSICA 220 kV	BIFÁSICA 2X25 kV	16,2
	SOBRAL	BIFÁSICA 220 kV	BIFÁSICA 2X25 kV	16,2
BEIRA BAIXA	FATELA	BIFÁSICA 220 kV	BIFÁSICA 2X25 kV	20

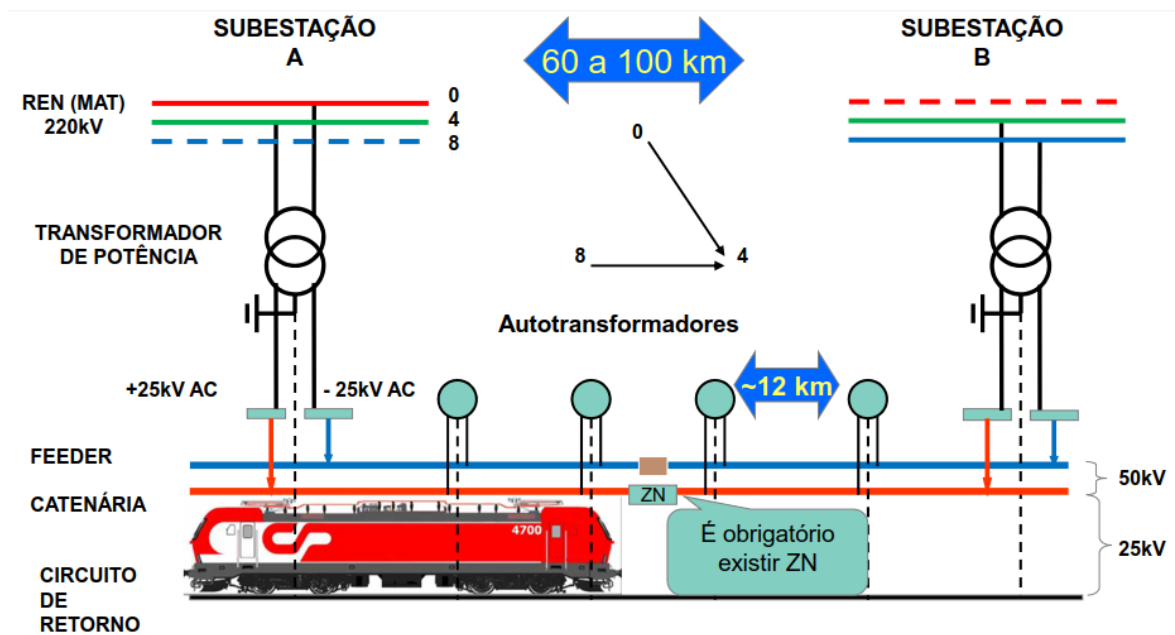


Figura 3.3 – Princípio de ligação bifásica de um sistema 2x25kV AC (adaptado de [2]).

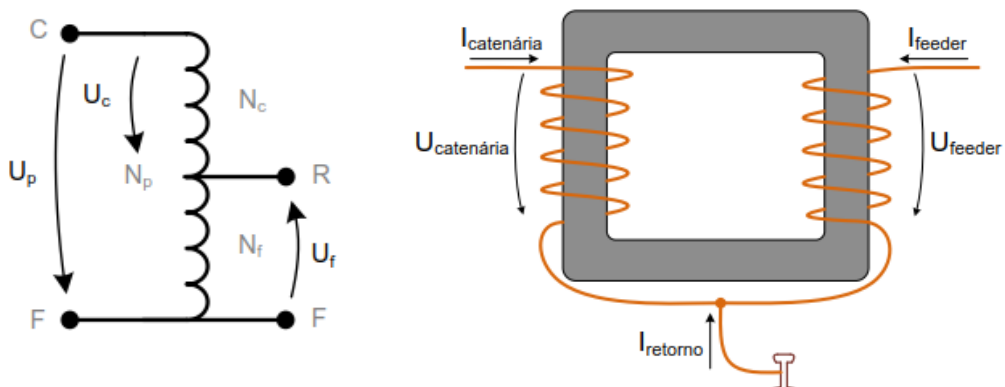


Figura 3.4 – Autotransformador de tração – diagrama e representação esquemática (adaptado de [6]).

A função dos autotransformadores de tração é distribuir a corrente de tração pela catenária e feeder de forma a diminuir as quedas de tensão ao longo da linha, ou seja, quando duas tensões se encontram desequilibradas, é transferida energia de um enrolamento para o outro para que haja um equilíbrio. Conforme também ilustrado na Figura 3.3, os postos autotransformadores de tração, são instalados entre 10 a 12 km de distância entre si, permitindo desta forma, garantir circulação de corrente no sistema de retorno à passagem de um comboio apenas na zona delimitada por dois autotransformadores de tração. Desta forma, consegue-se menores intensidades de corrente a passar pelo circuito de retorno e catenária, reduzindo de igual modo a tensão no carril [2], [6].

Quando a carga monofásica se encontra entre dois autotransformadores de tração, conforme ilustrado na Figura 3.5, a alimentação é feita através do troço da catenária a montante e a jusante, devido ao efeito dos autotransformadores. A corrente elétrica de tração que circula através dos dois autotransformadores de tração retorna à subestação maioritariamente através do feeder, sendo assim a corrente que circula nos carris e no solo é mínima. Esta situação de carga origina um desequilíbrio do sistema, onde a tensão de catenária junto ao autotransformador de tração tem tendência a baixar, contudo, como o conjunto dos dois enrolamentos do autotransformador de tensão abraçam um circuito magnético comum, faz com que a corrente se redistribua equitativamente pelo feeder e pela catenária sempre que esta encontra um autotransformador de tração. Uma vez que a corrente passa a ser redistribuída pela catenária e feeder, a queda de tensão é menos acentuada, pelo que se mantém uma tensão mais constante mesmo com as flutuações da carga [2], [6], [16].

Na secção 5.3.3, proceder-se-á à simulação de diversos cenários com o objetivo de analisar a distribuição de correntes do sistema 2x25kV caracterizada na Figura 3.5. Esta distribuição é efetuada da seguinte forma, a corrente consumida pelo comboio (I), retorna pelo sistema RCT para jusante ($1/2 I$) e montante ($1/2 I$) até aos respetivos autotransformadores. A montante, a corrente passa a ser redistribuída ($1/4 I$) pela catenária e ($1/4 I$) pelo feeder até ao próximo autotransformador. No autotransformador a jusante, a corrente ($1/2 I$) que chega pelo RCT juntamente com a corrente ($1/4 I$) do feeder vinda do autotransformador a montante, redistribuem-se, direcionando ($3/4 I$) para o comboio e ($1/2 I$) pelo feeder até à SST, regressando esta corrente ($1/2 I$) pela catenária. Desta forma a distribuição das correntes é otimizada, diminuindo a corrente que circula no sistema RCT.



Figura 3.5 – Distribuição de correntes num sistema 2x25kV AC (adaptado de [2]).

3.3. DIFERENÇAS DE POTENCIAL E DESFASAMENTOS ENTRE SUBESTAÇÕES

Conforme referido na secção 3.1.1, nos sistemas de energia de tração, ao invés da utilização da nomenclatura RST ou fase 1, fase 2, fase 3 para cada uma das fases de alimentação, é utilizada a designação de U0, U4 e U8 análogo ao utilizado nos índices horários. As SST no sistema 25 kV, são alimentadas com tensões primárias nominais de 63, 150 e 220 kV. Considerando que a alimentação em cada setor de catenária é monofásica e é disponibilizada por transformadores de potência alimentados por uma tensão composta, em ligação bifásica ou em “V”, resultam 6 possibilidades de alimentação da catenária. Nos sistemas de tração 2x25kV é disponibilizada uma alimentação bifásica (catenária + feeder), mantendo-se, contudo, as 6 possibilidades de alimentação à catenária. As DDP que são possíveis de surgir entre dois setores de catenária, dependem das fases que alimentam as SST e podem ser as representadas na tabela 3. Com base nas 6 possibilidades de alimentação à catenária referidas em epígrafe e através das possibilidades de diferenças de potencial da tabela 3, resulta o descrito na tabela 4 [8], [12].

Tabela 3 – Possibilidades de diferenças de potencial (adaptado de [8]).





				
Desfasamentos	0°	60°	120°	150°
DDP (kV)	0,0	25,0	43,3	50,0

Tabela 4 – Diferenças de potencial possíveis entre setores (adaptado de [8]).

		Setor A de catenária					
		U0-U4	U4-U8	U8-U0	U4-U0	U8-U4	U0-U8
Setor B de catenária	(kV)						
	U0-U4	0,0	43,3	43,3	50,0	25,0	25,0
	U4-U8	43,3	0,0	43,3	25,0	50,0	25,0
	U8-U0	43,3	43,3	0,0	25,0	25,0	50,0
	U4-U0	50,0	25,0	25,0	0,0	43,3	43,3
	U8-U4	25,0	50,0	25,0	43,3	0,0	43,3
U0-U8	25,0	25,0	50,0	43,3	43,3	0,0	

Como exemplo, considerando as tensões separadas pela ZN de São Marcos da Serra, o setor de catenária a sul da referida ZN é alimentado pela SST de Tunes (tensão U4-U8) e o setor a norte pela SST de Luzianes (tensão U8-U0). Através destes dados, observando a tabela 4, sabe-se que iremos ter uma DDP de 43,3 kV. É também possível, através do diagrama de vetores da Figura 3.6, verificar que as tensões estão desfasadas de 120°, logo pela observação da tabela 3 chega-se à mesma conclusão, iremos ter uma DDP de 43,3 kV. De seguida, demonstra-se analiticamente o cálculo e obtenção do valor de DDP de 43,3 kV.

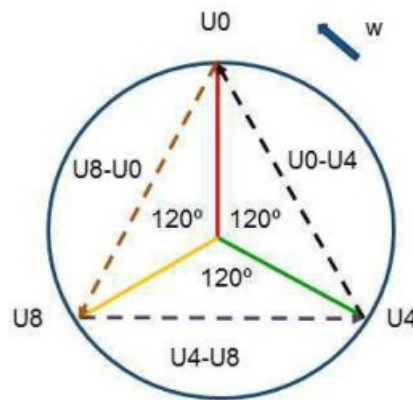


Figura 3.6 – Sistema de vetores do sistema trifásico [8]

Considerando o sistema trifásico de tensões simples visto do lado de alta tensão (AT) da RNT, temos que:

$$\vec{U}_{L1n} = U_{S_{AT}} \angle 90^\circ \quad (3.1)$$

$$\vec{U}_{L2n} = U_{S_{AT}} \angle -30^\circ \quad (3.2)$$

$$\vec{U}_{L3n} = U_{S_{AT}} \angle -150^\circ \quad (3.3)$$

Referindo estas tensões ao lado de média tensão (MT) da SST, resulta:

$$\vec{U}_0 = U_{S_{MT}} \angle 90^\circ \quad (3.4)$$

$$\vec{U}_4 = U_{S_{MT}} \angle -30^\circ \quad (3.5)$$

$$\vec{U}_8 = U_{S_{MT}} \angle -150^\circ \quad (3.6)$$

Conforme referido, a tensão no setor alimentado pela SST de Tunes é dada por $\vec{U}_4 - \vec{U}_8$, que resulta:

$$\begin{aligned} \vec{U}_4 - \vec{U}_8 &= U_{S_{MT}} \angle -30^\circ - U_{S_{MT}} \angle -150^\circ \\ &= \sqrt{3} \cdot U_{S_{MT}} \angle 0^\circ = U_{C_{MT}} \angle 0^\circ \\ &= 25 \angle 0^\circ \text{ kV} \end{aligned} \quad (3.7)$$

e a tensão no setor alimentado pela SST de Luzianes é dada por $\overrightarrow{U8} - \overrightarrow{U0}$, que resulta:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{U8} - \overrightarrow{U0} &= U_{S_{MT}} \angle -150^\circ - U_{S_{MT}} \angle 90^\circ \\ &= \sqrt{3} \cdot U_{S_{MT}} \angle -120^\circ = U_{C_{MT}} \angle -120^\circ = 25 \angle -120^\circ \text{ kV}\end{aligned}\quad (3.8)$$

Desta forma, a diferença de potencial na ZN de São Marcos da Serra será:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{DDP} &= (\overrightarrow{U4} - \overrightarrow{U8}) - (\overrightarrow{U8} - \overrightarrow{U0}) \\ &= 3 \cdot U_{S_{MT}} \angle 30^\circ = 3 \cdot U_{C_{MT}} / \sqrt{3} \angle 30^\circ = 43,3 \angle 30^\circ \text{ kV}\end{aligned}\quad (3.9)$$

Conclui-se que a DDP entre os dois setores é de 43,3 kV conforme queríamos demonstrar.

3.4. IMPLEMENTAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES

As subestações são estruturadas de forma a permitir várias configurações de exploração considerando diversos caminhos redundantes de forma a que a indisponibilidade de alguns equipamentos não condicione a continuidade do serviço e considerando uma elevada disponibilidade do sistema, isto através de alimentação dupla e equipamentos de reserva. De uma forma geral, conforme ilustrado na Figura 3.7, as subestações são caracterizadas por [2]:

- **Alimentação em nível de tensão AT ou MAT**
 - Linhas de alimentação bifásicas ou trifásicas;
 - Duas linhas independentes.
- **Parque de Alta**
 - Equipamentos de AT/MAT com funções de corte, proteção e medição;
 - Equipamentos duplicados e redundantes.
- **Transformadores de potência**
 - “Coração da SST” – redução do nível de tensão para o valor a aplicar na catenária;
 - Um ou dois transformadores em serviço mais um de reserva.
- **Parque de Média**
 - Equipamentos de MT com funções de corte, proteção e medição;
 - Equipamentos duplicados e redundantes.
- **Edifício de Comando**
 - Equipamentos de comando, telecomando e telecomunicações;
 - Serviços complementares (contagens, registos de acontecimentos, telemedida).

Os equipamentos das SST podem apresentar duas soluções no que diz respeito à sua construção, isto é, podem possuir o isolamento exterior a ar com equipamentos instalados no exterior ou apresentar uma solução interior compacta tipo GIS (Gas Insulated Switchgear) com isolamento a hexafluoreto de enxofre (SF₆) para os equipamentos de MT/AT. A solução interior apenas encontra-se implementada em Portugal na SST de Tunes na linha do Algarve [2].



Figura 3.7 – Vista aérea da subestação de tração de Luzianes 1x25 kV AC [2].

3.5. EQUIPAMENTOS DAS SUBESTAÇÕES

SECCIONADORES

Os seccionadores são aparelhos destinados a interromper ou estabelecer a continuidade de um circuito elétrico e que, sem poder de corte garantido, não devem ser manobrados em carga, onde os contatos dos mesmos estão visíveis. Representa-se na Figura 3.8 exemplos de seccionadores utilizados nas SST em Portugal pela IP [6]. Tipicamente, os seccionadores podem ser de duas posições ou de três posições. Os seccionadores de duas posições podem assumir os estados “fechado/aberto” ou “fechado/terra” e os de três posições os estados “fechado/aberto/terra”. Os mais usuais, representados na Figura 3.9, são os que têm duas posições, “fechado/aberto” ou “fechado/terra”, por vezes descritos como “fechado/aberto à terra”. Estes aparelhos acrescem à função de interromper ou estabelecer a continuidade de um circuito elétrico, a possibilidade de ligar à terra as instalações a um dos terminais, quando na posição “terra”. Os elementos articulados do seccionador, ilustrados na Figura 3.10, podem ser manobrados manualmente ou através de motor elétrico, ou das duas maneiras, conforme a configuração pretendida.

Quando o comando é manual, a manobra é realizada através de um manípulo colocado em local acessível. Esta manobra apenas pode ser executada localmente. Quando o comando é elétrico, o manípulo é substituído por uma caixa de comando motorizada. Nestes casos a manobra pode ser executada local ou remotamente [6].

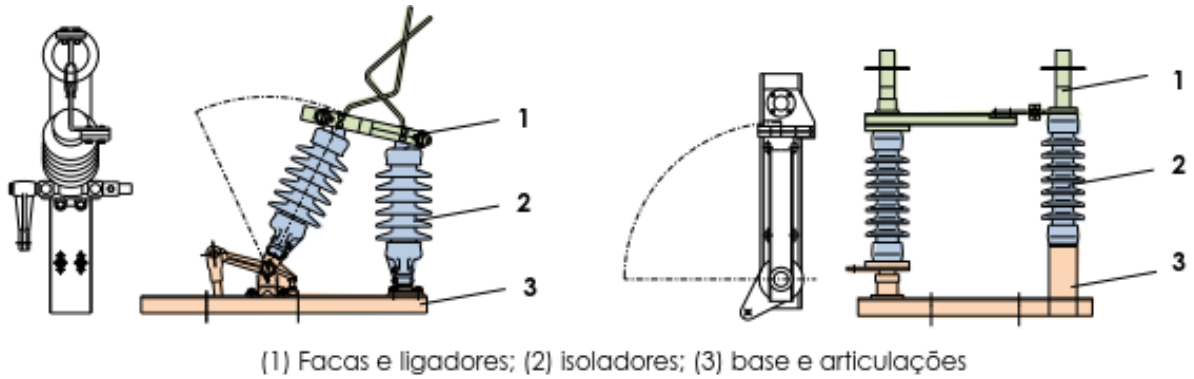


Figura 3.8 – Polo de seccionador: Basculante tipo CP4 (esquerda), rotativo com um isolador fixo (direita) (adaptado de [6]).

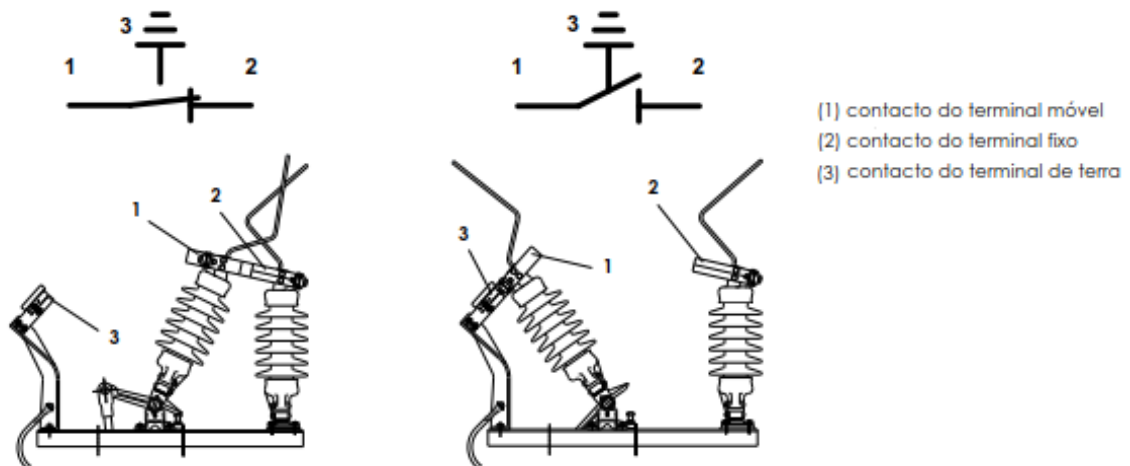


Figura 3.9 – Seccionador de duas posições em posição “fechado” (esquerda), e em posição “terra” (direita) (adaptado de [6]).

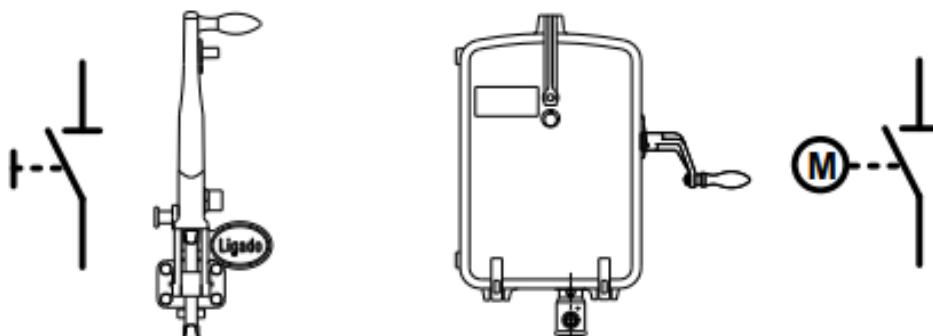


Figura 3.10 – Comando manual (esquerda), Comando elétrico (direita) (adaptado de [6]).

INTERRUPTORES E DISJUNTORES

Por se tratar de equipamentos muito semelhantes na sua constituição, opta-se por realizar uma abordagem conjunta estando os mesmos ilustrados na Figura 3.11. Os interruptores são aparelhos de corte concebidos para interromper ou estabelecer a continuidade de um circuito elétrico. Estes dispõem de poder de corte para correntes de carga nominais. Os disjuntores são aparelhos de corte e proteção concebidos para interromper ou estabelecer a continuidade de um circuito elétrico. Os disjuntores dispõem de poder de corte para correntes de defeito (curto-circuito), ou seja, os disjuntores aliam às funcionalidades de um interruptor, a capacidade de operar com correntes de curto-circuito. Dado a necessidade de eliminar as correntes de defeito no mais curto intervalo de tempo, os disjuntores são dotados de mecanismos de atuação mais rápidos que os dos interruptores [6].

A manobra dos interruptores é feita por comando do operador. Os disjuntores ilustrados no esquema da Figura 3.12, podem ser manobrados por comando do operador ou automaticamente por ordem de uma proteção elétrica, caso seja identificada uma anomalia no normal funcionamento do sistema. Neste caso, o comando de abertura é dado por uma proteção elétrica que monitoriza permanentemente a forma de onda da corrente e/ou da tensão. Sempre que a proteção elétrica identifica uma anomalia nos parâmetros que está a monitorizar, envia uma ordem de abertura ao disjuntor e este interrompe o circuito elétrico [6], [17].

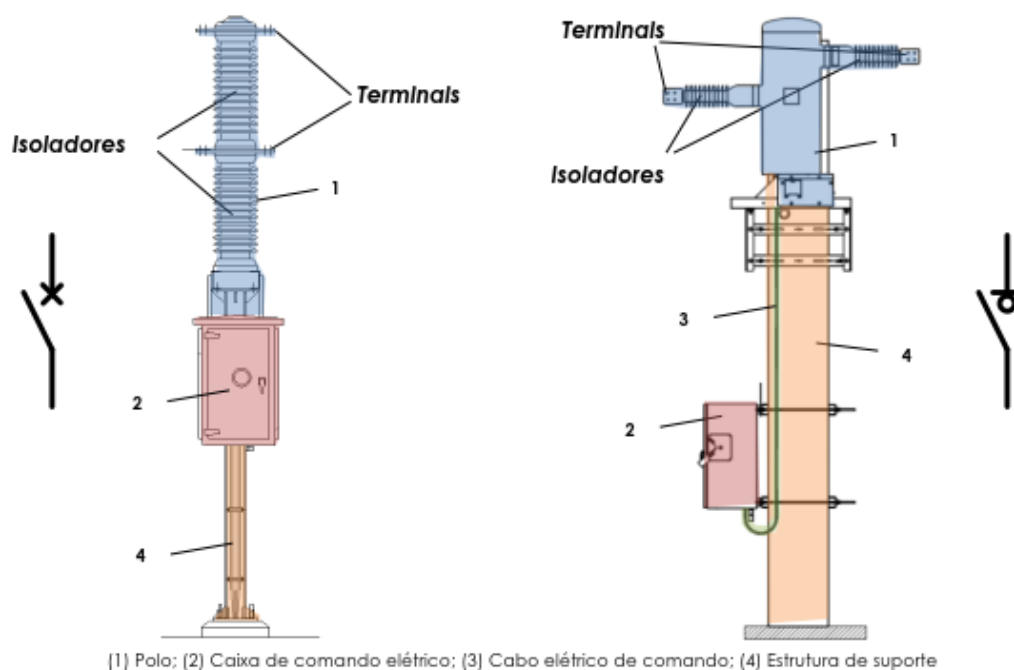


Figura 3.11 – Disjuntor FXT9 da EFACEC (esquerda) e interruptor SDR 25 da Schneider (direita) (adaptado de [6]).

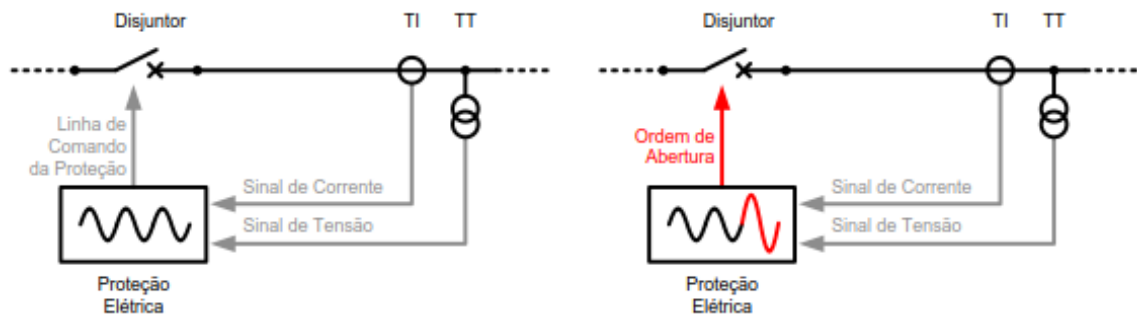


Figura 3.12 – Atuação de disjuntor por ordem da proteção [6].

TRANSFORMADORES DE INTENSIDADE

Os diversos transformadores de intensidade (TI), ilustrados na Figura 3.13, são transformadores de medida que têm como função reproduzir uma “imagem” da corrente que circula nas linhas ou barramentos. Os TI são ligados em série com o circuito e devem suportar as mesmas solicitações elétricas, nomeadamente um curto-circuito ou uma sobretensão do sistema. A corrente secundária que os TI produzem deve ser proporcional em módulo à amplitude da corrente do primário e a sua diferença de fase ser mínima [6], [17], [18].

Os TI são utilizados quando o circuito a observar é de tensão elevada (isolando o circuito de medida) ou quando os valores de corrente primária são demasiado grandes para permitirem a utilização de aparelhagem de baixo custo e dimensões. Os TI podem ser dotados de circuitos secundários múltiplos, com características distintas, para as diversas finalidades: medida, proteção, contagem de energia, etc. Os TI de proteção tem como principal objetivo medir correntes com valores muito elevados, neste caso, correntes de defeito muito superiores ao da corrente nominal. Já com os TI de medida pretende-se realizar medições de energia em funcionamento normal de forma muito exata [6], [17].

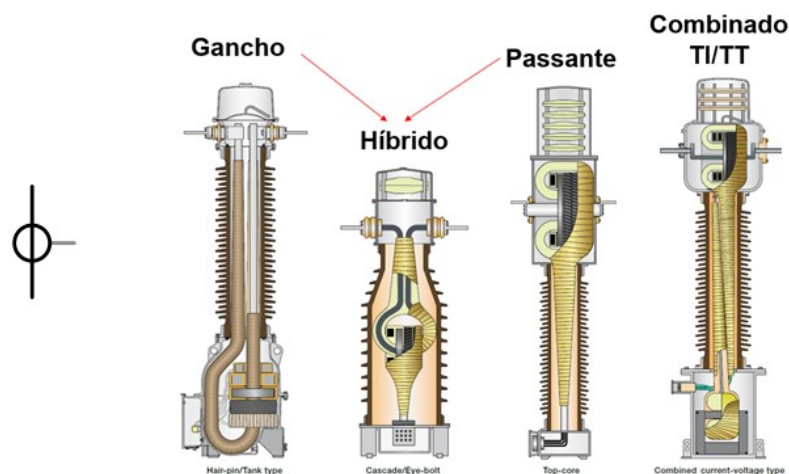


Figura 3.13 – Tipos de transformadores de corrente (adaptado de [6] e [17]).

TRANSFORMADORES DE TENSÃO

Os transformadores de tensão (TT), ilustrados na Figura 3.14, são transformadores de medida que têm como função reproduzir uma “imagem” da tensão aplicada em linhas ou barramentos. A tensão secundária que os TT produzem deve ser proporcional à tensão primária e desfasada em relação a essa de um ângulo aproximadamente nulo, para um sentido apropriado das ligações. Os TT são ligados entre a fase e terra e a tensão de isolamento terá o valor normalizado imediatamente acima da tensão de serviço. Os TT podem ser dotados de circuitos secundários múltiplos, com características distintas, para as diversas finalidades pretendidas: medida, proteção, contagem de energia, etc. [6], [17], [18].

Os TT utilizados na RFN são genericamente de dois tipos, indutivos ou capacitivos.

- **Indutivos** – Estes transformadores são do tipo magnético bobinados, ou seja, são compostos por um núcleo magnético em torno do qual se bobinam os circuitos primários e secundários. O primário destina-se a ser ligado entre a linha ou barramento a observar e à terra. O enrolamento secundário tem menos espiras que o primário para reduzir a um valor mensurável pelos equipamentos de medida. Este enrolamento secundário está em circuito aberto para medir a tensão a esses terminais conforme se ilustra na Figura 3.15 [6], [17].
- **Capacitivos** – Os TT capacitivos são compostos por uma cadeia de condensadores, colocados entre o condutor de fase a observar e a terra associados a um TT bobinado, conforme se ilustra na Figura 3.16. Desta forma, a tensão aplicada ao enrolamento primário é apenas uma parte da tensão do sistema (função de divisor de tensão). Este tipo de TT é utilizado geralmente quando a tensão primária é igual ou superior a 150 kV [6], [17].

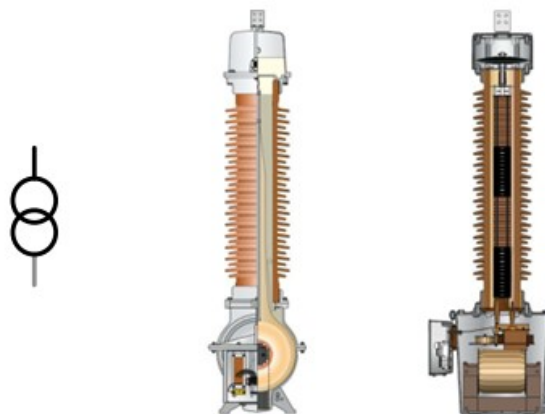


Figura 3.14 – Tipos de transformadores de tensão - TT indutivo (esquerda) e TT capacitivo (direita)
(adaptado de [6]).

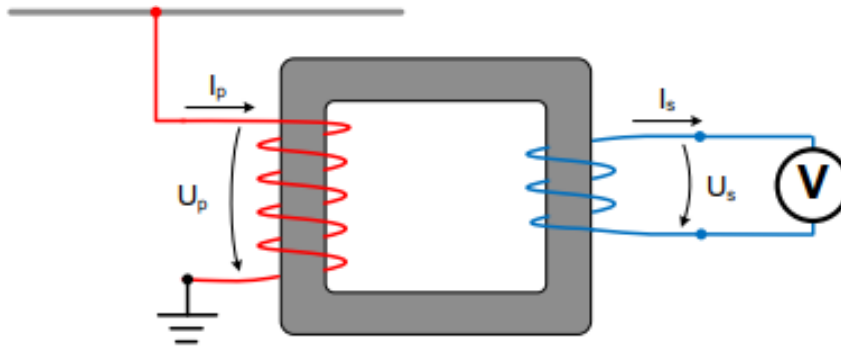


Figura 3.15 – Diagrama de TT indutivo [6].

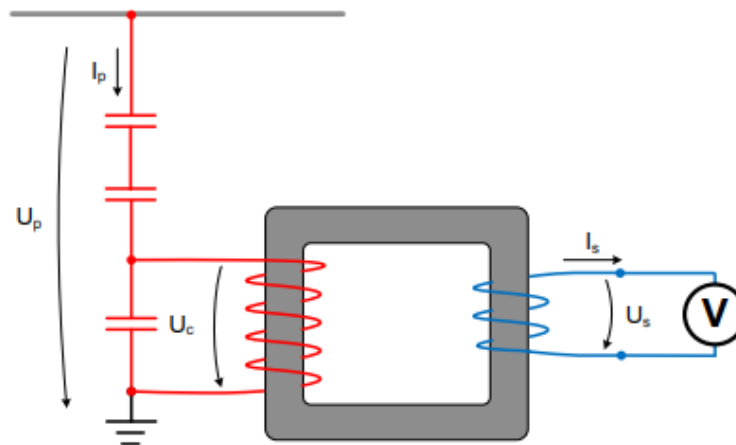


Figura 3.16 – Diagrama de TT capacitivo [6].

TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Os transformadores são máquinas elétricas estáticas que têm como função a transferência de energia elétrica de um circuito, a outro, permitindo a modificação das amplitudes da tensão e da intensidade de corrente, funcionando apenas em sistemas de corrente alternada. Um transformador é composto por enrolamentos primário(s) e secundário(s) e um núcleo que realiza o acoplamento magnético entre os enrolamentos. Convencionou-se que o circuito primário é aquele que está do lado da geração e o circuito secundário aquele que está ligado à carga. Um transformador composto por dois enrolamentos designa-se por transformador monofásico, conforme ilustrado na Figura 3.17 [6].

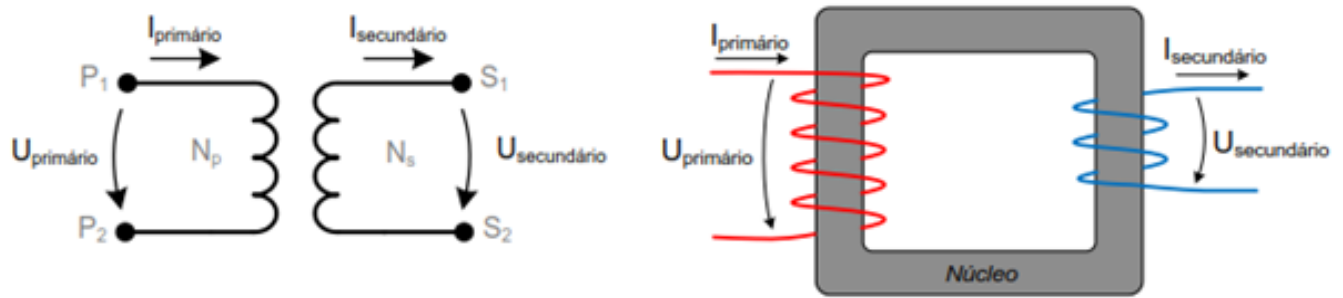


Figura 3.17 – Representação esquemática e diagrama de um transformador monofásico (adaptado de [6]).

Desde que não exista qualquer ligação direta entre os terminais do enrolamento primário e os terminais do enrolamento secundário, os dois enrolamentos são eletricamente isolados (isolamento galvânico). Conforme referido, a transferência de energia é realizada por indução magnética. Esta característica é útil quando se pretende separar os sistemas de terra no primário e secundário. Desta forma, um transformador de potência (TP) é um aparelho que tem como função alimentar cargas elétricas, adaptando a tensão da rede para um nível adequado a essas cargas. Pode também ser designado por transformador de alimentação (TA) e, no caso de se tratar de um transformador instalado numa Subestação de Tração, por transformador de tração (TT) embora possa causar conflitos com a designação dos transformadores de medida de tensão (TT) [6].

Os transformadores de potência podem ter diversas configurações dependendo do tipo de aplicação pretendido. Os transformadores mais simples, são os monofásicos com dois enrolamentos, um primário e um secundário, tendo na totalidade quatro terminais (Figura 3.18 - esquerda). Os transformadores bifásicos são em tudo idênticos aos transformadores monofásicos, sendo a diferença apenas no esquema de ligações. Designa-se transformador monofásico quando é aplicada uma tensão simples ao enrolamento primário (um dos terminais encontra-se ligado ao neutro) e transformador bifásico quando é aplicada uma tensão composta ao enrolamento primário (duas fases) (Figura 3.18 - direita). Devido à natureza dos sistemas de catenária alimentados em corrente alternada, por imposição do fornecedor de energia, os transformadores de tração são do tipo bifásico de forma a limitar as perturbações introduzidas no sistema trifásico (desequilíbrio nas tensões). Ao enrolamento primário é aplicada uma tensão composta (são ligadas duas das três fases da rede de alimentação) e a tensão no secundário do transformador de tração é monofásica e é obtida através da ligação de um dos terminais à catenária e à terra [6].

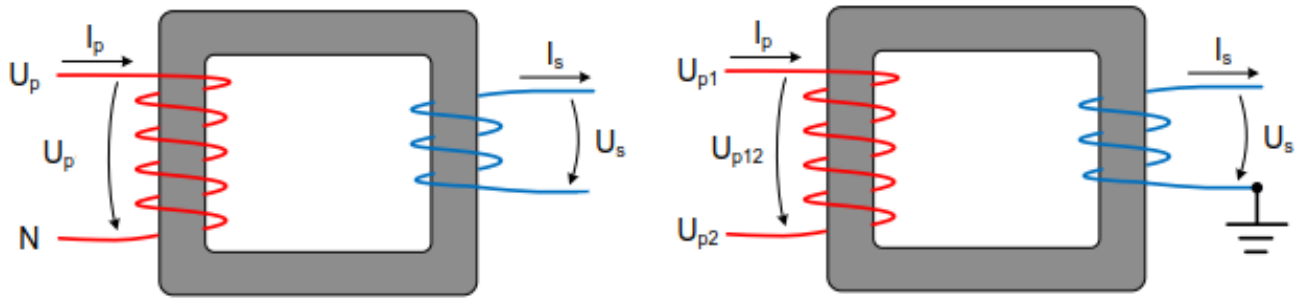


Figura 3.18 – Diagrama do transformador monofásico (esquerda) e transformador de tração 1x25 kV (direita) (adaptado de [6]).

CONSTITUIÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Conforme referido anteriormente, o transformador é uma máquina elétrica estática constituída essencialmente por um núcleo e enrolamentos primários e secundários. Dependendo das características dos transformadores, são necessários componentes adicionais, representados na Figura 3.19, para garantir o seu correto funcionamento [6].

A condução de corrente pelos condutores dos enrolamentos dos transformadores irá provocar o seu aquecimento. Os transformadores de baixa potência não geram calor significativo pelo que não necessitam de sistemas de arrefecimento especiais sendo o seu arrefecimento normalmente conseguido por convecção natural do ar. Os transformadores de maior potência geram maiores quantidades de calor que têm de ser transferidas dos condutores para o exterior de forma a evitar danos nos seus componentes. Na grande parte dos transformadores de potência os enrolamentos e núcleo são imersos em óleo mineral numa cuba metálica. A característica deste óleo adequa-se às necessidades de garantir o arrefecimento dos condutores dos enrolamentos e também o isolamento elétrico entre os enrolamentos (sujeitos a tensão) e a cuba (ligada à terra) [6].

Para garantir que os enrolamentos e núcleo do transformador se encontram sempre imersos em óleo, estes transformadores são dotados de um compensador de óleo que é instalado acima da cuba conforme representado na Figura 3.19. Eventuais fugas de óleo na cuba são assim compensadas com óleo do compensador, visível na Figura 3.20. Tem também como função evitar sobrepensões na cuba resultante de expansão do volume do óleo devido a subidas de temperatura, o que acontece absorvendo o óleo em excesso [6].

A ligação elétrica entre os condutores ou barramentos exteriores e os enrolamentos do transformador é feita através de travessias. A travessia é um isolador oco que é atravessado por um condutor. As travessias dos transformadores podem ser secas ou também elas imersas em óleo. O depósito de óleo das travessias imersas usualmente não tem comunicação com a cuba do transformador. Nos transformadores de maior porte, para potenciar a transferência de calor do óleo para o exterior são montados radiadores, por onde o óleo circula por convecção natural ou forçado por bombas elétricas. Por vezes são instalados ventiladores para circulação de ar forçado nos radiadores [6].

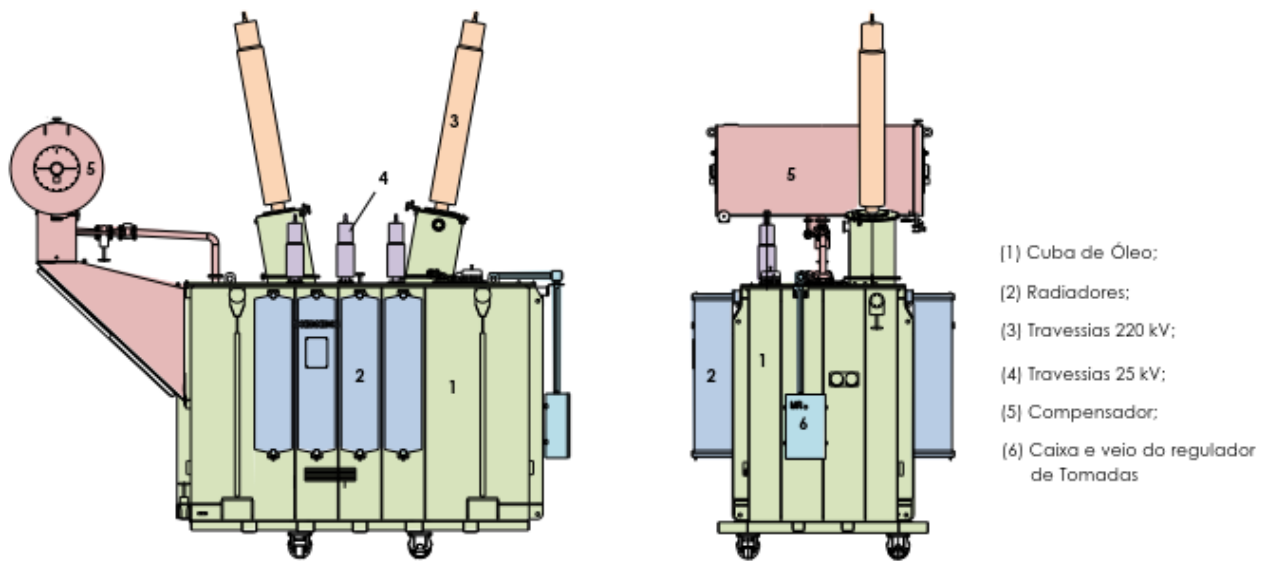


Figura 3.19 – Transformador de 20 MVA 220/2x25 kV Siemens – SST Fatela (adaptado de [6]).



Figura 3.20 – Transformador de 12 MVA 150/27,5 kV Siemens – SST Luzianes.

TOMADAS DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Os transformadores de potência podem ser dotados de tomadas intermédias nos seus enrolamentos primários ou secundários. Esta funcionalidade confere ao transformador a possibilidade de dispor de uma relação de transformação ajustável. A relação de transformação é obtida através da proporção entre o número de espiras do enrolamento primário e do enrolamento secundário. Conforme representado na Figura 3.21, o número de espiras do enrolamento primário é maior quando for utilizada a tomada 1 (T1) e menor quando utilizada a tomada 2 (T2).

Quando aplicada a mesma tensão no primário (U_p) na tomada 1 e na tomada 2, a tensão no secundário (U_s) será maior quando for utilizada a tomada 2. Desta forma conclui-se que a redução do número de espiras no enrolamento primário provoca um aumento na tensão do secundário [6]. Em contraponto, para reduzir a tensão no secundário deve aumentar-se o número de espiras no enrolamento primário. Normalmente as tomadas são de dois tipos: fixa (acessível) e regulável (não acessível). Os transformadores com tomadas fixas dispõem de um terminal acessível por cada tomada. O número de tomadas nestes transformadores é usualmente em número reduzido, tanto por questões funcionais como de espaço [6].

Tome-se como exemplo os transformadores de potência do sistema 2x25 kV, representado na Figura 3.22, que no seu enrolamento secundário dispõem de uma tomada central fixa. Estes transformadores apresentam três terminais no secundário. Na prática, os transformadores do sistema 2x25 kV têm uma tensão nominal no secundário de 50 kV [6].

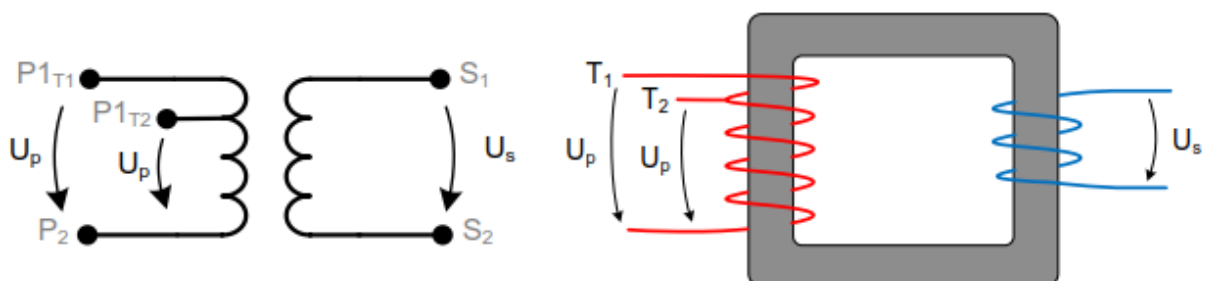


Figura 3.21 – Representação esquemática e diagrama de um transformador monofásico com duas tomadas no enrolamento primário (adaptado de [6]).

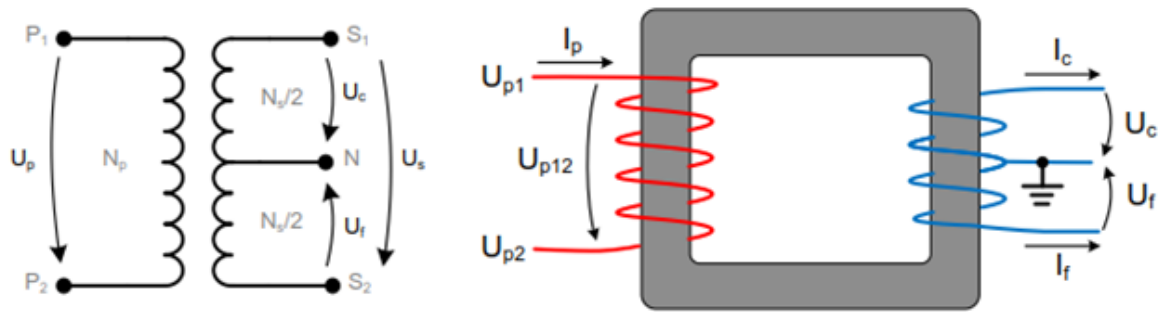


Figura 3.22 – Diagrama e representação esquemática de um transformador de tração 2x25 kV (adaptado de [6]).

Considerando que na Figura 3.22, o terminal S1 é ligado à catenária, o terminal S2 ao feeder negativo e o terminal N à terra, obtém-se a seguinte relação:

$$\vec{U}_S = \vec{U}_C - \vec{U}_f \quad (3.10)$$

Sabendo que:

$$\vec{U}_S = \vec{U}_P \cdot \frac{N_S}{N_P} \quad (3.11)$$

Como a tomada no secundário é no centro do enrolamento, tem-se que:

$$\vec{U}_C = \vec{U}_P \cdot \frac{N_S}{2 \cdot N_P} = \frac{\vec{U}_S}{2} \quad (3.12)$$

$$\vec{U}_f = -\vec{U}_P \cdot \frac{N_S}{2 \cdot N_P} = -\frac{\vec{U}_S}{2} \quad (3.13)$$

Considerando que a tensão nominal na catenária (\vec{U}_C) é $25 \angle 0^\circ \text{ kV}$, tem-se então que a tensão no feeder negativo (\vec{U}_f) é $-25 \angle 0^\circ \text{ kV}$ e a tensão no secundário do transformador (\vec{U}_S) é:

$$\vec{U}_S = \vec{U}_C - \vec{U}_f = 25 \angle 0^\circ - (-25 \angle 0^\circ) = 50 \angle 0^\circ \text{ kV} \quad \text{de (3.10)}$$

Nos transformadores de potência utilizados em sistemas de tração em corrente alternada (1x25 kV e 2x25 kV) ao enrolamento primário é aplicada uma tensão composta (são ligadas duas das três fases da rede de alimentação). O terminal da tomada central do enrolamento secundário do transformador para o sistema 2x25 kV é ligado à terra e os outros dois à catenária e ao feeder negativo [6].

Os transformadores com tomadas reguláveis dispõem de um regulador de tomadas que altera o ponto onde se encontram ligados um ou mais terminais. Neste caso não existem mais terminais para as tomadas adicionais. Este tipo de sistema possibilita a disponibilização de maior quantidade de tomadas. A utilização de transformadores com regulação de tomadas permite alterar a tensão no secundário do transformador, de forma a compensar eventuais variações lentas na tensão da rede de alimentação, conferindo assim maior autonomia e flexibilidade na exploração da rede que se encontra a jusante do transformador [6].

REGULADOR DE TOMADAS DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

O valor eficaz da tensão nas redes de transporte e distribuição não é sempre constante. Esta variação está relacionada com o balanço entre a geração e o consumo e também com o controlo de tensão efetuado nas instalações geradoras. Para que seja possível controlar localmente a tensão no secundário do transformador, contrariando as variações da tensão na rede de transporte ou distribuição ligada ao primário, os transformadores podem ser dotados de tomadas reguláveis, conforme descrito anteriormente. Nos transformadores de maior porte a regulação de tomadas é feita através de um mecanismo comandado eletricamente designado por regulador de tomadas. A regulação da tensão de saída do transformador é realizada automaticamente pelo próprio regulador de tomadas, visível na Figura 3.23, consoante parâmetros previamente definidos ou por comando do operador. Por se tratar de um equipamento de atuação mecânica, a sua utilização não é adequada à compensação de quedas de tensão decorrentes da alimentação elétrica aos comboios uma vez que o seu tempo de resposta é muito lento quando comparado com as variações de carga e da tensão. Deve sim, ser utilizado para compensar as variações na tensão de longa ou duração prolongada [6].



Figura 3.23 – Transformador de 12 MVA 150/27,5 kV – SST Luzianes com regulador de tomadas.

REGIMES DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

A potência dos transformadores é limitada essencialmente pela capacidade que estes têm para dissipar o calor gerado nos condutores dos enrolamentos quando atravessados pela corrente elétrica. Conforme referido anteriormente, o arrefecimento dos condutores é feito essencialmente por convecção, mas também por condução e radiação térmica.

No caso dos transformadores imersos em óleo, em primeira instância, o calor gerado pelos condutores é transferido para o óleo e depois do óleo para o exterior. Quanto maior a temperatura do ar que envolve o transformador pior será o seu desempenho, é por isso necessário criar as condições adequadas para a refrigeração do transformador, dependendo das características do próprio transformador e também das características do meio envolvente. Quando sujeito a uma carga, a temperatura do transformador eleva-se gradualmente até atingir uma temperatura de equilíbrio. A potência nominal dos transformadores é usualmente definida para um regime de carga constante e permanente. Em função da aplicação e como requisito, podem ser definidos adicionalmente regimes de sobrecarga com duração limitada, que o transformador deve ser capaz de suportar. Os transformadores de tração, devido à natureza das cargas que alimentam (comboios), são sujeitos a cargas com variações de amplitude rápidas e significativas. Por essa razão, a potência dos transformadores é definida, não apenas para um regime de carga constante e permanente, mas também para um conjunto de sobrecargas de duração limitada. Os transformadores de tração das SST da RFN estão dimensionados para os regimes de carga indicados na Tabela 5 [6].

Tabela 5 – Regimes de carga dos transformadores de tração (adaptado de [6]).

Carga	Duração
100%	Contínuo
150%	60 minutos
200%	5 minutos

4. RETORNO DE CORRENTE DE TRACÇÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

O normativo de retorno de corrente de tração, terras de proteção (RCT+TP), é a especificação, cujo objetivo principal é criar um ambiente seguro para os seres humanos e sistemas eletrônicos na vizinhança da via-férrea e ainda garantir o RCT [19]. O sistema de terras em instalações elétricas de tração, tem de ser compatível com os sistemas elétricos de sinalização ferroviária e telecomunicações e estar em conformidade com as normas nacionais e internacionais [20].

4.2. TIPOS DE SISTEMAS DE RCT

Conforme descrito no capítulo 2, o sistema de catenária está dividido em secções elementares. Ao contrário dos sistemas DC, o fornecimento de energia a 25 kV é comparável a uma configuração típica de distribuição radial. O transformador da SST alimenta a catenária com uma tensão nominal de 25 kV sendo três tipos de sistema de transporte de energia possíveis: sistema tradicional (ST), sistema com condutor de retorno (RT) e sistema com autotransformadores (AT) [19].

Na catenária, conforme ilustrado na Figura 4.1, estes sistemas podem ser reconhecidos pelo cabo de terra aéreo (CdTA) e/ou pelo feeder.

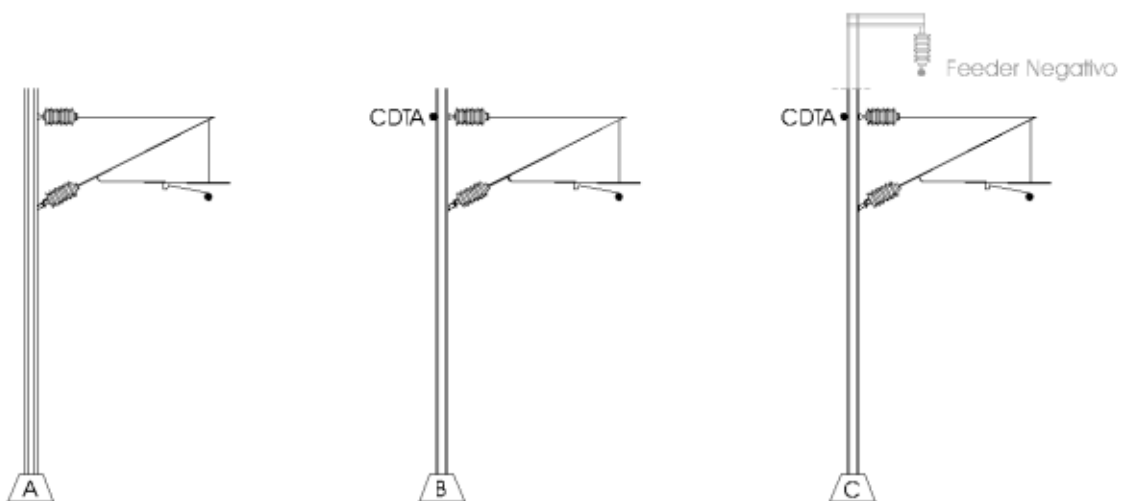


Figura 4.1 – Configurações de catenária nos sistemas ST (a), RT (b) e AT (c) [19]

4.2.1. SISTEMA TRADICIONAL

O **sistema ST** (sistema tradicional ou standard) é o sistema de 25 kV mais simples. A catenária baseia-se apenas na utilização de um fio de contacto e um cabo de suporte. O sistema utiliza também um cabo de terra enterrado (CdTE) que é colocado em cada caminho de cabos existente. Desta forma, o RCT e de ligação à terra consiste apenas nos carris e no CdTE [19].

4.2.2. SISTEMA COM CONDUTOR DE RETORNO

O segundo sistema é o **sistema RT** (sistema com condutores de retorno) e conforme se observa na Figura 4.2, baseia-se nos carris, num cabo de terra aéreo contínuo e pelo menos num CdTE. Se existir mais do que um caminho de cabos haverá em cada um deles um CdTE. Os condutores do sistema de RCT são ligados entre si a intervalos regulares para que a corrente de retorno no sistema se distribua pelos vários condutores [19].

4.2.1. SISTEMA COM AUTOTRANSFORMADORES

Quando estão em jogo o fornecimento e a distribuição a grande distância de energia com valores elevados, é aconselhável a utilização do **sistema AT**. Neste sistema, conforme exposto no capítulo 3 e conforme se verifica na Figura 4.3, a SST alimenta a catenária a uma tensão de +25 kV e simultaneamente alimenta pelo feeder os autotransformadores a uma tensão de -25 kV. Como resultado o transporte de energia entre a subestação e os autotransformadores é efetuado a uma tensão de 50 kV e a alimentação da carga (comboio) é realizada a 25 kV. Quando uma composição ocupa uma secção situada entre dois autotransformadores a SST está a alimentar a composição por intermédio de dois postos AT. Deste modo, a corrente de tração flui através de dois autotransformadores, retornando de seguida à SST em grande parte através do feeder. Assim, a corrente de tração nos carris e no solo nas secções adjacentes é mínima, quando comparada com a totalidade da corrente de tração [19].

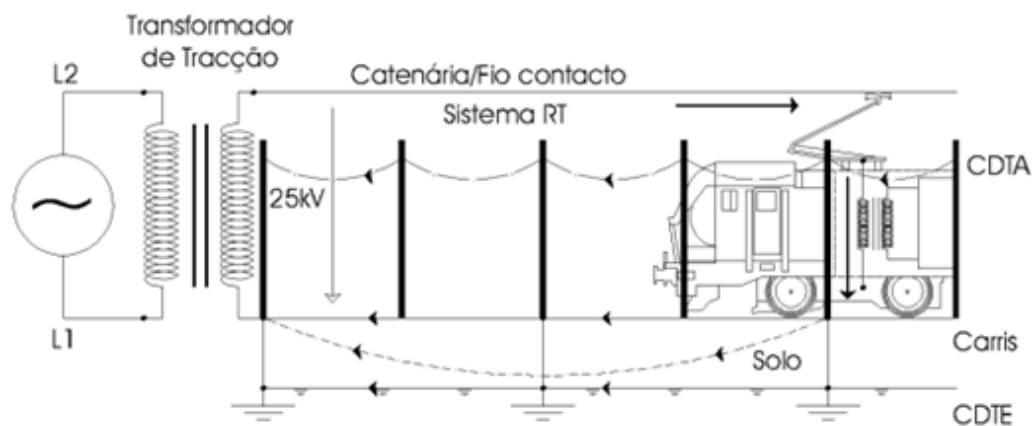


Figura 4.2 – Retorno da corrente de tração no sistema RT [19].

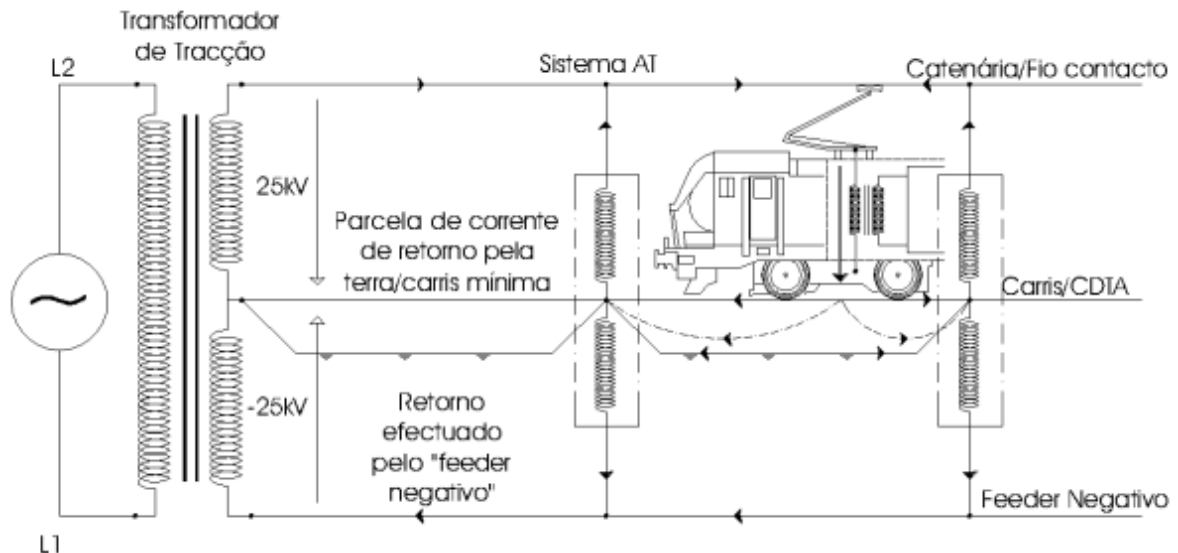


Figura 4.3 – Retorno da corrente de tração no sistema AT [19].

4.3. SISTEMA CONTÍNUO DE RETORNO DE CORRENTE

Para todos os condutores necessários ao RCT+TP, uma interrupção no sistema de RCT não pode originar tensões de contacto para além dos limites e não deverá conduzir a um funcionamento deficiente do sistema de tração e terras. Para tal, os vários condutores distribuídos ao longo da via, nomeadamente, os carris, os condutores de terra aéreos, os condutores de terra enterrados, as blindagens dos cabos de sinalização e telecomunicações e o solo (terra), têm de garantir um caminho de retorno controlado para a corrente de tração com baixa impedância longitudinal desde a zona neutra até à SST. O sistema de retorno tem de garantir a continuidade eléctrica, existindo sempre dois caminhos por via para o RCT (critério de redundância, de acordo com o conceito “fail-safe”, requisito da Norma EN 50126) [20], [21].

4.4. CABO DE TERRA ENTERRADO

O CdTE é um cabo em cobre nu enterrado ao longo da via, instalado por baixo ou no caminho de cabos. Apresenta uma secção de 48 mm^2 constituído por fios de cobre e tem como função principal providenciar uma ligação física à terra e dar possibilidade de ligar objetos à terra. No caso de pontes, tuneis, plataformas ou outras estruturas, o CdTE deixa de estar em contacto com o solo sendo encaminhado através de caminhos ou condutas de cabos [12], [22]. Terá de ser colocado um CdTE em paralelo com todos os caminhos de cabos que contenham cabos com condutores metálicos [22]. A ligação e continuidade eléctrica do CdTE tem de ser efectuada unicamente nas caixas de inspeção e visita [21].

4.5. CABO DE TERRA AÉREO

O cabo de terra aéreo (CdTA) é um cabo nu, fixo aos postes de catenária através de uma pinça e eletricamente contínuo ao longo de toda a via. Apresenta uma secção de 93,3 mm² constituído por fios de alumínio-aço e tem como função a ligar à terra os apoios de catenária. No novo sistema de retorno da corrente de tração, serve também para transportar parte desta corrente para a SST [9]. O CdTA deve estar de acordo com as especificações da catenária aplicáveis e por princípio, por cada via é necessário um CdTA [12], [21].

5. SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE TRACÇÃO ELÉTRICA

Para análise ao sistema de alimentação de tração elétrica, recorrendo ao software de simulação MATLABTM/Simulink [23], serão simulados diversos cenários que permitirão verificar o seu funcionamento.

5.1. TRÂNSITO DE ENERGIA

Com base nos mapas da RNT de eletricidade, das SST, dos troços de linha eletrificada, diagrama unifilar de transito da RNT e esquemas longitudinais de catenária presentes nos anexos I, III, IV, V, VI e VII respetivamente, elaboraram-se os diagramas de rede a utilizar nas simulações dos sistemas 1x25 kV e 2x25 kV, cada um dos sistemas contendo uma SST, dois setores de catenária com cargas de tração associadas, separadas das SST contíguas por ZN, conforme se representa na Figura 5.1 e na Figura 5.2.

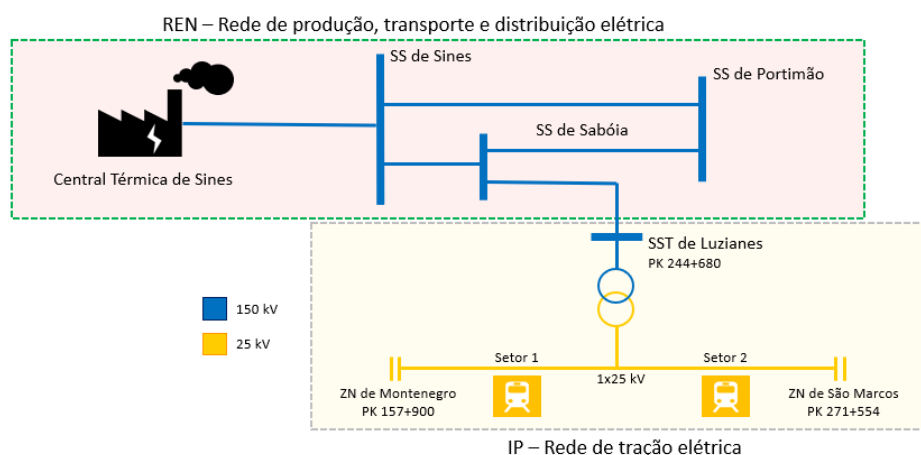


Figura 5.1 – Diagrama de rede para o sistema de 1x25 kV.

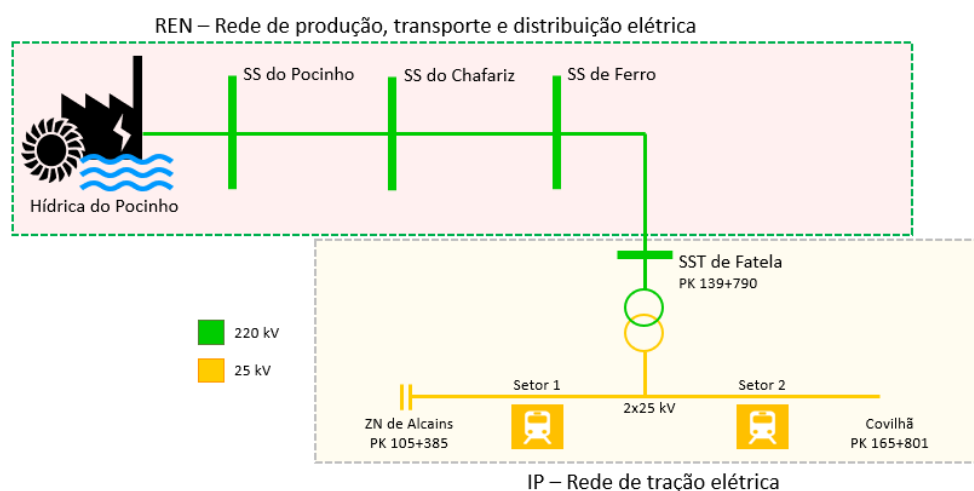


Figura 5.2 – Diagrama de rede para o sistema de 2x25 kV.

5.2. MODELAÇÃO DO SISTEMA 1x25 kV

Com base no diagrama de rede representado na Figura 5.1, foi elaborado o modelo em ambiente Matlab/Simulink, conforme se representa na Figura 5.3. Para a modelação deste cenário, com base nos mapas da RNT de electricidade e diagrama unifilar de transito da RNT [24], foi escolhida como origem de produção de energia, a central térmica de Sines. A rede de transmissão é constituída por linhas de transmissão com condutor do tipo Bear a uma tensão de 150 kV [24]. A rede de transmissão encontra-se construída em anel fechado, isto através de uma linha de transmissão “linha 1-3” entre a subestação de Sines e a subestação de Portimão, através da linha de transmissão “linha 1-2” entre a subestação de Sines e a subestação de Sabóia e por último através da linha de transmissão “linha 2-3” entre a subestação de Sabóia e a subestação de Portimão. A partir da subestação de Sabóia segue o ramal de alimentação “linha 2-4” que irá alimentar a SST de Luzianes transformando a tensão da rede de transmissão de 150 kV para as características necessárias ao fornecimento de energia eléctrica ao material circulante através da catenária a 25 kV. Os setores de catenária, com base no esquema longitudinal de catenária de Luzianes (anexo VI) foram subdivididos nas diversas secções elementares existentes. As cargas de tração inseridas nas secções elementares tiveram como base os horários e gráficos de circulação da respetiva linha de circulação ferroviária. Igualmente, tendo como base a caracterização da RNT [24], foram inseridas na rede, cargas às saídas das subestações de Sines e Portimão.

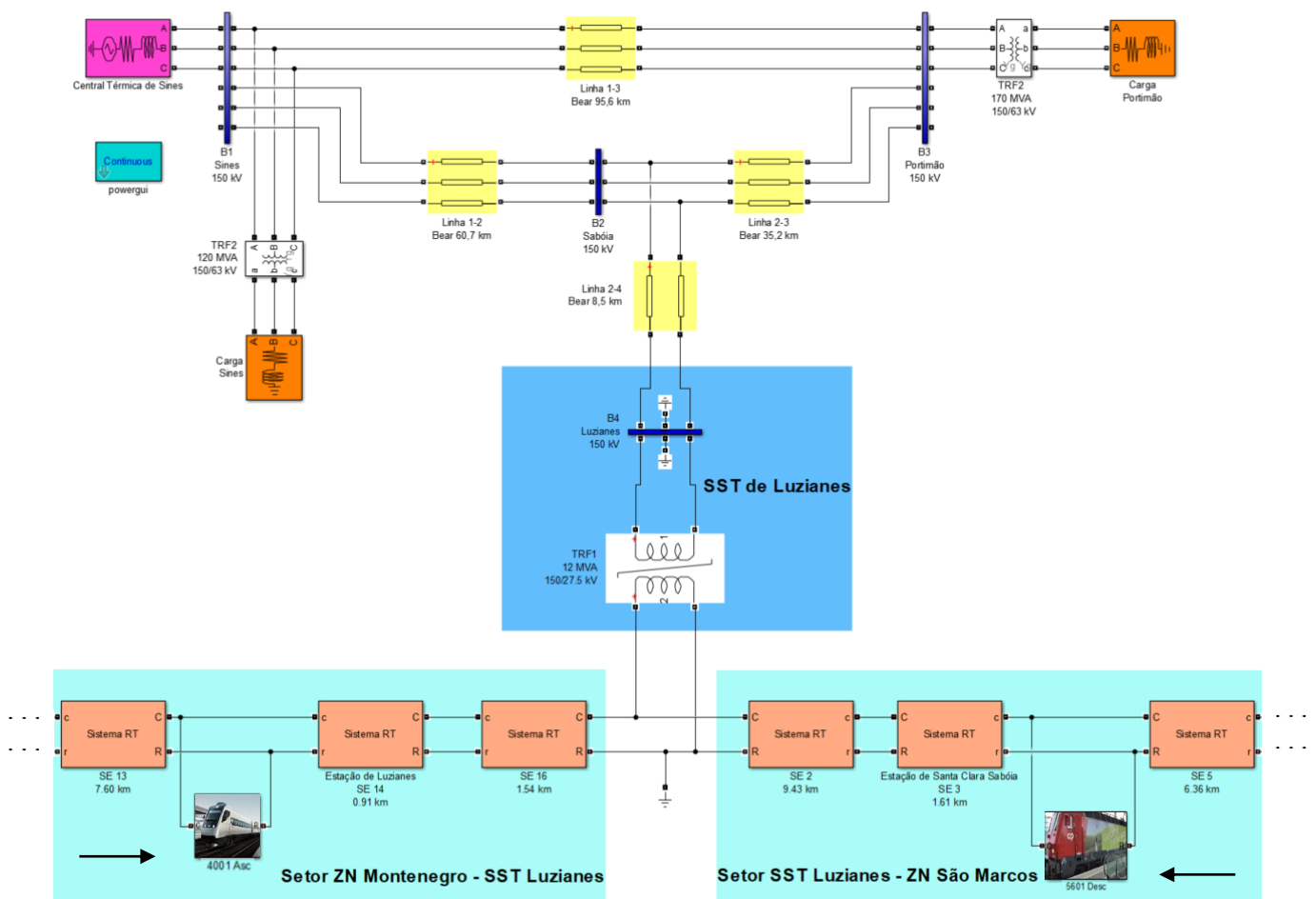


Figura 5.3 – Modelo de Matlab/Simulink para o sistema de 1x25 kV.

5.2.1. CONFIGURAÇÃO DOS BLOCOS DE SIMULAÇÃO

5.2.1.1. FONTE DE GERAÇÃO DE ENERGIA

A fonte de geração de energia adotada para o sistema 1x25 kV foi a central térmica de Sines. Deste modo, para a modelação em ambiente Matlab/Simulink, utilizou-se o bloco de simulação “*Three-Phase Source – RL Branch*”. Neste bloco, com base na caracterização da RNT [24], conforme se verifica na Figura 5.4, foram definidos os parâmetros de tensão composta, frequência da rede e valor de potência de curto-circuito, sendo estes os seguintes:

$$V_{n3F} = 150 \text{ kV}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$S_{cc} = 6919 \text{ MVA}$$

5.2.1.2. LINHAS DE TRANSMISSÃO

Com base nos mapas da RNT de eletricidade, diagrama unifilar de transito da RNT e através das características elétricas das linhas de MAT especificadas na caracterização da RNT [24], sabe-se que os blocos das linhas de transmissão (linha 1-3), (linha 1-2) e (linha 2-3) são linhas trifásicas de 150 kV com condutor do tipo Bear. Pelas características dos condutores de alumínio, geometria dos postes tipo e linhas aéreas [25] e [26] especifica-se os restantes dados para a parametrização do bloco de simulação “*Powergui – RLC Line Parameters Tool*” conforme se verifica na Figura 5.5, nomeadamente:

Poste do tipo T; linha simples; altura do poste de 25 m

Cabo Condutor tipo Bear; 2,345 cm de diâmetro; Resistência elétrica de 0,1093 Ω /km

Cabo de Guarda tipo Guínea; 1,400 cm de diâmetro; Resistência elétrica de 0,3598 Ω /km

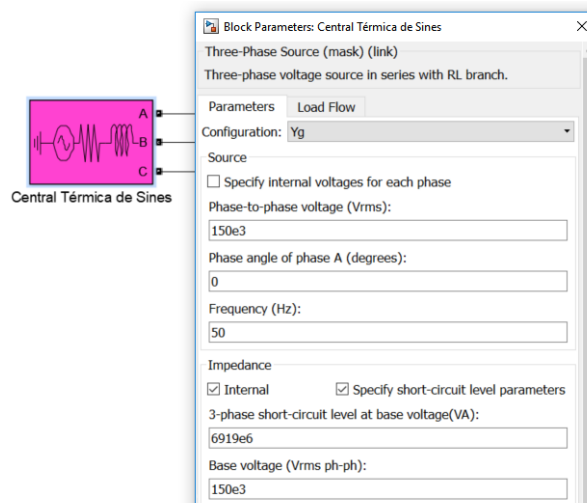


Figura 5.4 – Bloco de simulação “*Three-Phase Source – RL Branch*”.

Com os dados introduzidos no bloco de simulação da Figura 5.5, através da opção “*Compute RLC line parameters*” e pela seleção dos blocos (linha 1-3), (linha 1-2) e (linha 2-3) determinam-se os valores de resistência e indutância das linhas de transmissão, conforme se verifica na Figura 5.6, nomeadamente:

$$R_L = 0,11207 \Omega/km$$

$$L_L = 0,001366 H/km$$

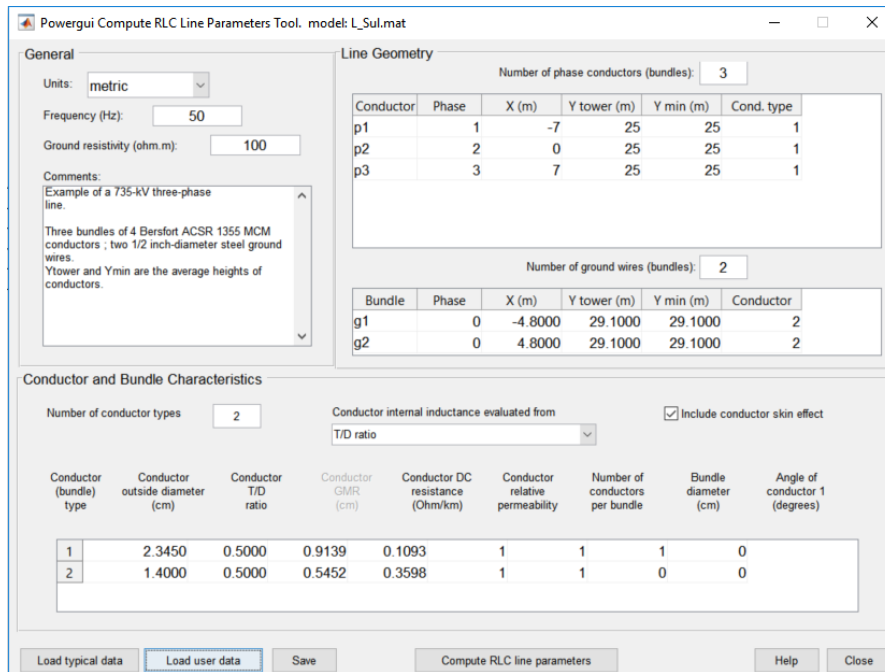


Figura 5.5 – Bloco de simulação “*Powergui – RLC Line Parameters Tool*”.

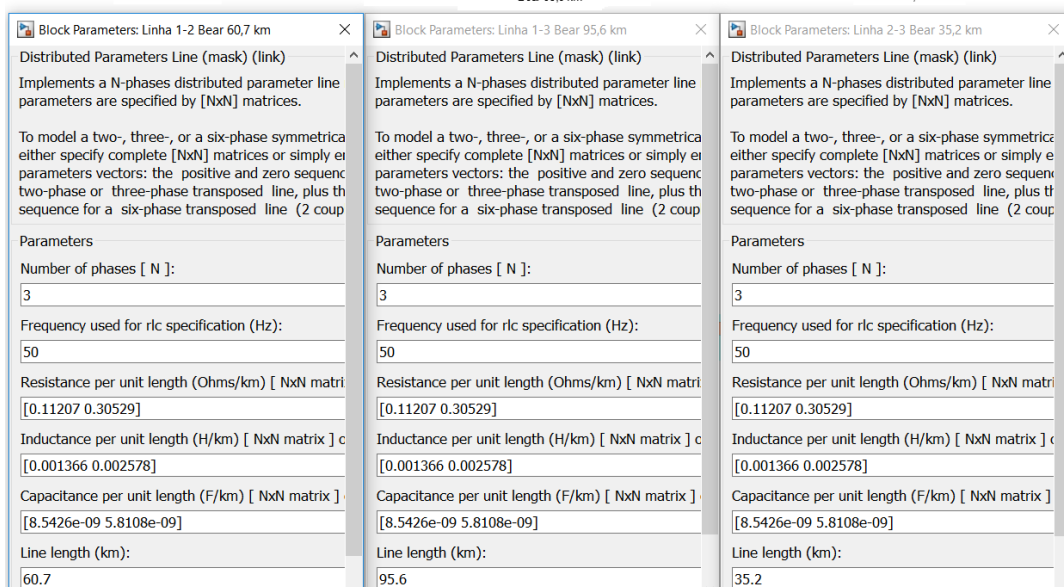
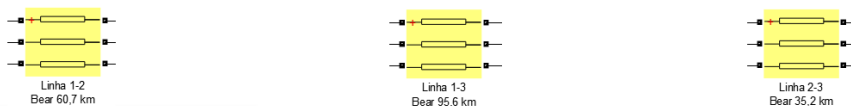


Figura 5.6 – Bloco de simulação “*Distributed Parameters Line*”.

Para a modelação da linha de transmissão entre a subestação de Sabóia e a subestação de tração de Luzianes, procedeu-se ao mesmo raciocínio que o descrito anteriormente, com a diferença de este ramal ser formado apenas com duas fases, fases U0 e U8, (linha bifásica), observando-se este parâmetro na geometria da linha no bloco de simulação da Figura 5.7. Novamente, através da opção “Compute RLC line parameters” e pela seleção dos blocos (linha 2-4) determinam-se os valores de resistência e indutância desta linha de transmissão, conforme se verifica na Figura 5.8, nomeadamente:

$$R_{L2-4} = 0,18966 \Omega/km$$

$$L_{L2-4} = 0,001864 H/km$$

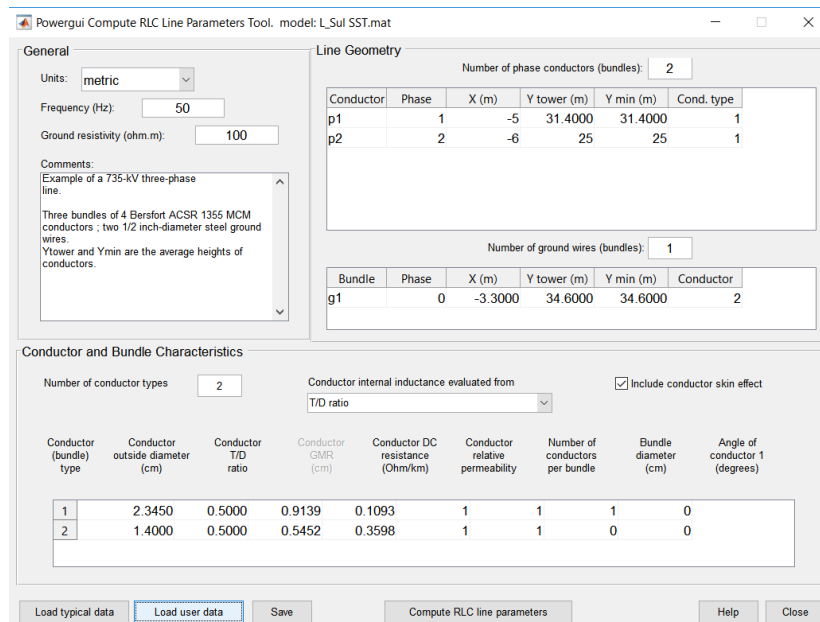


Figura 5.7 – Bloco de simulação “Powergui – RLC Line Parameters Tool”.

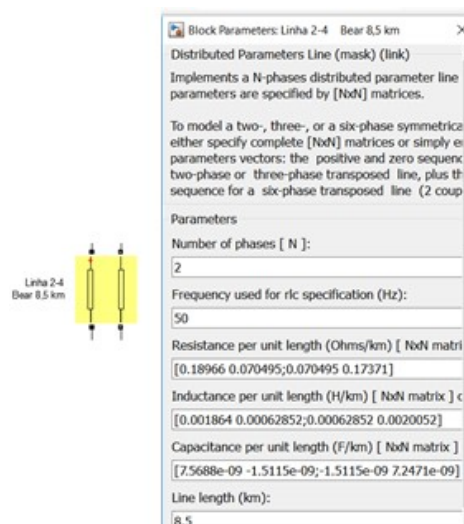


Figura 5.8 – Bloco de simulação “Distributed Parameters Line”.

5.2.1.3. SUBESTAÇÃO DE TRAÇÃO

Na SST de Luzianes, a tensão da rede de transmissão será transformada de 150 kV para 27,5 kV por forma a que a característica necessária ao fornecimento de energia elétrica ao material circulante em regime nominal através da catenária seja a 25 kV. Pela observação das características do transformador de potência da subestação de Luzianes foram definidos, conforme se observa pelos dados do bloco de simulação da Figura 5.9, os parâmetros da potência nominal, frequência da rede e valor de tensão composta nos enrolamentos do primário e secundário do transformador, sendo estes os seguintes:

$$S_n = 12 \text{ MVA}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$V_{n1} = 150 \text{ kV}$$

$$V_{n2} = 27,5 \text{ kV}$$

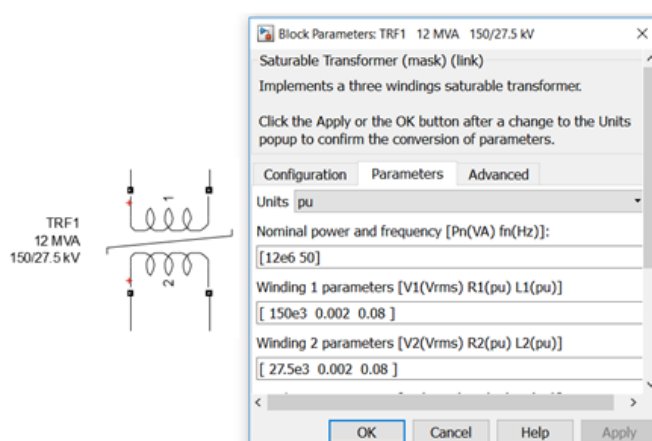


Figura 5.9 – Bloco de simulação “Saturable Transformer”.

5.2.1.4. SISTEMA DE TRAÇÃO

O sistema de tração elétrica da linha do Sul, conforme descrito anteriormente é constituído por dois setores de catenária. Com base no esquema longitudinal de catenária de Luzianes (anexo VI), estes setores de catenária, conforme se observa na Figura 5.10 foram subdivididos nas diversas secções elementares existentes. Para o setor de 35,93 km a norte da SST, delimitado entre a ZN de Montenegro e a SST de Luzianes, foram seleccionadas para o estudo 9 secções elementares, incluindo as SE das estações da Funcheira, Amoreiras e Luzianes. O setor de 27,35 km a sul da SST, delimitado entre a SST de Luzianes e a ZN de São Marcos, apresenta 4 secções elementares, incluindo a SE da estação de Santa Clara Sabóia.

A modelação do sistema de tração em ambiente Matlab/Simulink foi realizada conforme se observa pela Figura 5.11. Pode-se verificar que cada secção elementar do sistema de tração é constituída por dois blocos de simulação “*Series RLC Branch*”, ou seja, um bloco para o sistema de catenária e outro bloco para o carril. Não se tendo conseguido obter os dados oficiais pela IP relativos às características do sistema de tração, utilizaram-se os valores referenciados em [27], sendo os seguintes:

Impedância da Catenária: $Z_C = 0,1192 + j0,7522 \Omega/km$

Impedância do Carril: $Z_R = 0,1648 + j0,6709 \Omega/km$

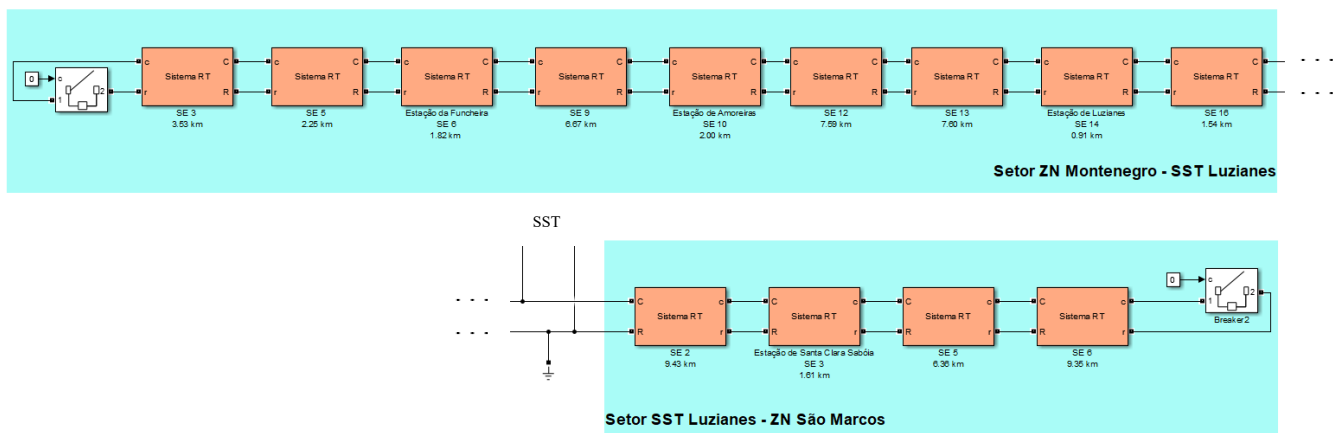


Figura 5.10 – Modelação do sistema de transmissão de tração.

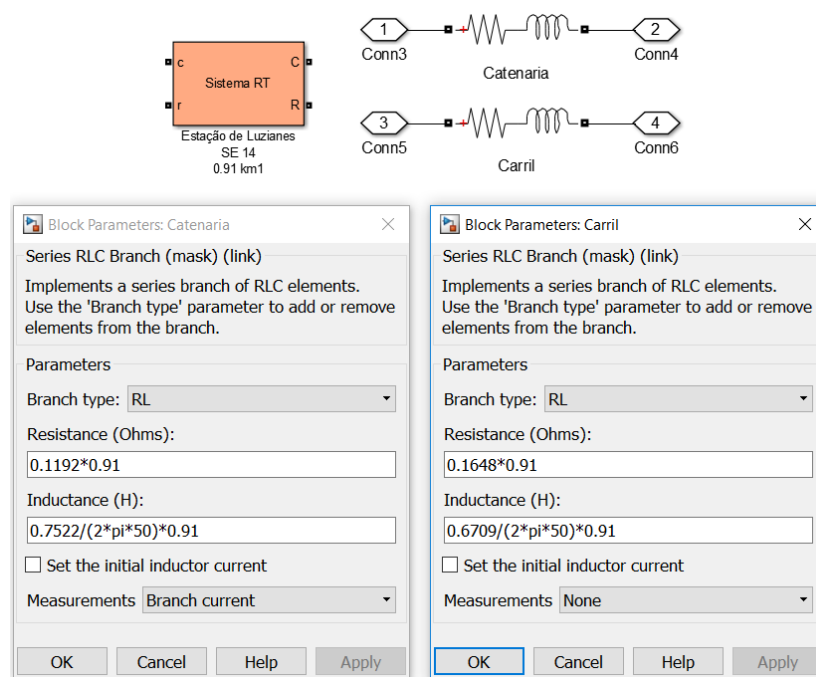


Figura 5.11 – Bloco de simulação “*Series RLC Branch*”.

5.2.1.5. CARGAS DE TRAÇÃO

As cargas de tração inseridas nas secções elementares tiveram como base os horários e gráficos de circulação da respetiva linha de circulação ferroviária. Através da introdução de interruptores entre cada secção elementar e pela comutação desses interruptores foi simulado o movimento dos comboios. Conforme se observa pelos dados da Figura 5.12, foi utilizado um bloco de simulação do tipo “Series RLC Load” de potência constante. Existem dois tipos de comboios a circular na linha do Sul, a locomotiva elétrica da série 5600 (vulgarmente chamado de intercity) e a automotora da série 4000 (vulgarmente chamado por alfa pendular) [28]. Considerando uma carga móvel de potência e velocidade constante, com um fator de potência de 0,8, conforme se verifica na Figura 5.12 utilizaram-se dois blocos de simulação com as seguintes características:

Comboio Intercidades

Locomotiva Elétrica da Série 5600

- $V_n = 25 \text{ kV}$
- $f = 50 \text{ Hz}$
- $P = 5600 \text{ kW}$
- $S = 7000 \text{ kVA}$
- $Q = 4200 \text{ kvar}$

Comboio Alfa Pendular

Automotora da Série 4000

- $V_n = 25 \text{ kV}$
- $f = 50 \text{ Hz}$
- $P = 4000 \text{ kW}$
- $S = 5000 \text{ kVA}$
- $Q = 3000 \text{ kvar}$

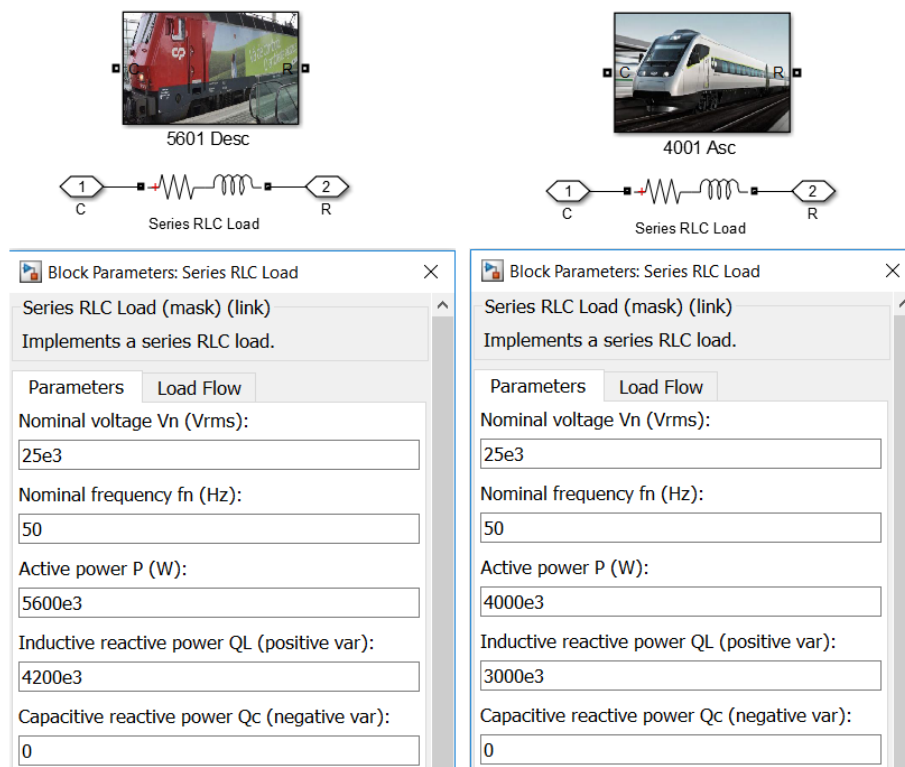


Figura 5.12 – Bloco de simulação “Series RLC Load”.

5.2.1.6. CARGAS

Igualmente, tendo como base a caracterização da RNT [24], foram inseridas na rede, cargas às saídas das subestações de Sines e Portimão. Para o efeito, utilizou-se o bloco de simulação “*Three-Phase Series RLC Load*”, que conforme se verifica na Figura 5.13, foram definidos os parâmetros de tensão composta, frequência da rede, valor de potência ativa e reativa, sendo estes os seguintes:

Carga de Sines

$$V_n = 150 \text{ kV}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$P = 93.8 \text{ MW}$$

$$Q = 15,2 \text{ Mvar}$$

Carga de Portimão

$$V_n = 150 \text{ kV}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$P = 47,1 \text{ MW}$$

$$Q = 10,8 \text{ Mvar}$$

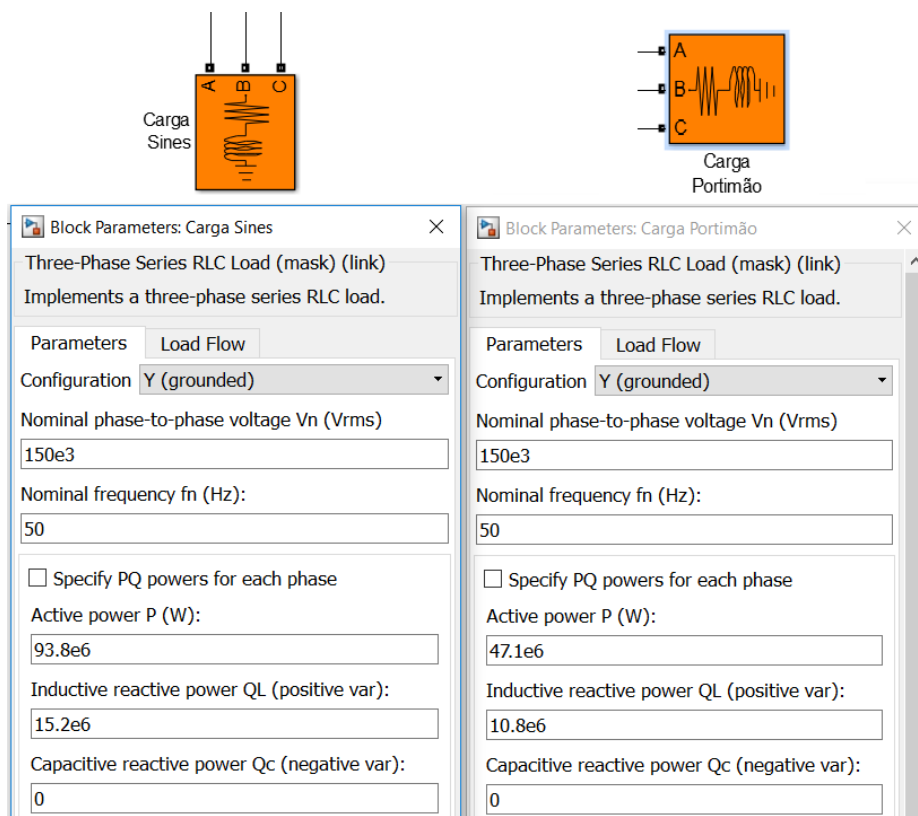


Figura 5.13 – Bloco de simulação “*Three-Phase Series RLC Load*”.

5.2.2. SIMULAÇÃO DO SISTEMA 1x25 kV

Com o objetivo de analisar o comportamento dos sistemas de alimentação de catenária e desequilíbrios causados na rede trifásica de transmissão procedeu-se a várias simulações do sistema 1x25 kV, de acordo com a representação da Figura 5.3. Com base nas premissas descritas anteriormente, consideraram-se os diversos cenários de simulação:

- **Cenário 1** – Sistema ferroviário em vazio;
- **Cenário 2** – Carga móvel de potência constante;
- **Cenário 3** – Duas cargas móveis de potência constante;
- **Cenário 4** – Perturbação na rede de tração.

5.2.2.1. CENÁRIO 1

O objetivo deste cenário é verificar a correta modelação do sistema pretendido e confirmar os valores descritos no capítulo 3. Os valores da tensão na geração são os esperados, nomeadamente 150 kV de valor eficaz da tensão composta e respetivo valor de pico de 212 kV, conforme se verifica na Figura 5.14. Pela observação da Figura 5.15, constata-se também os valores esperados para o primário e secundário do transformador de tensão da SST de Luzianes, sendo estes 150 kV e 27,5 kV (V_{RMS}) respetivamente.

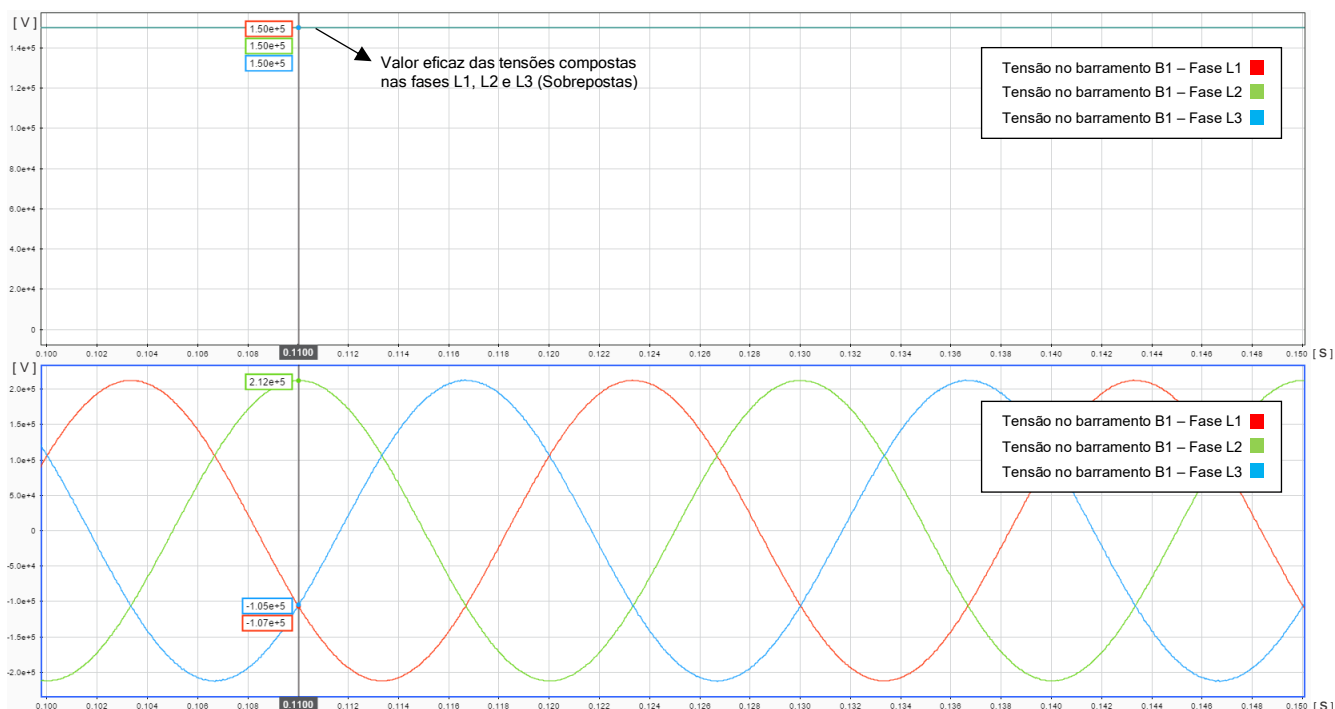


Figura 5.14 – Tensões na geração (Barramento de Sines - B1) – Cenário 1.

Topo: Evolução do valor eficaz das tensões compostas; Fundo: Evolução instantânea das tensões compostas.

Um sistema trifásico de tensões equilibrado é caracterizado por três tensões sinusoidais com amplitudes iguais e defasamento de 120° entre si. Nas situações em que as tensões de um sistema trifásico apresentam amplitudes diferentes ou defasamento assimétrico, diferente de 120° , considera-se que o sistema é desequilibrado ou assimétrico. Conforme já referido, um dos principais problemas colocados pelas SST à rede fornecedora de energia é o desequilíbrio provocado pelas cargas monofásicas de tração (comboio) à rede trifásica de alimentação tornando-se assim importante quantificar esse desequilíbrio. O desequilíbrio pode ser definido através da teoria das componentes simétricas. Cada tensão do sistema trifásico corresponde à soma vetorial das componentes de sequência direta, inversa e homopolar sendo que, a razão entre a componente de sequência inversa com a componente de sequência direta, pode ser usada para especificar a percentagem do desequilíbrio [29]. Observando a Figura 5.16, verifica-se que o coeficiente de desequilíbrio presente no barramento de Portimão é praticamente nulo (0,015 %) quando o sistema ferroviário se encontra em vazio, sendo este apenas devido às cargas aplicadas à saída das subestações de Sines e Portimão.

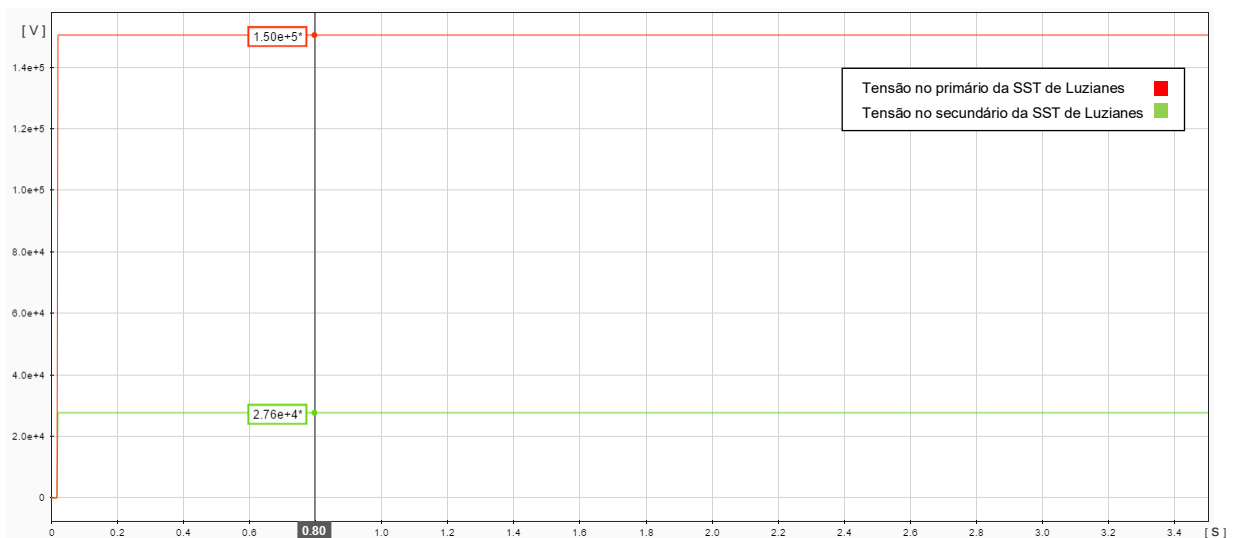


Figura 5.15 – Valor eficaz das tensões no primário e secundário da SST – Cenário 1.

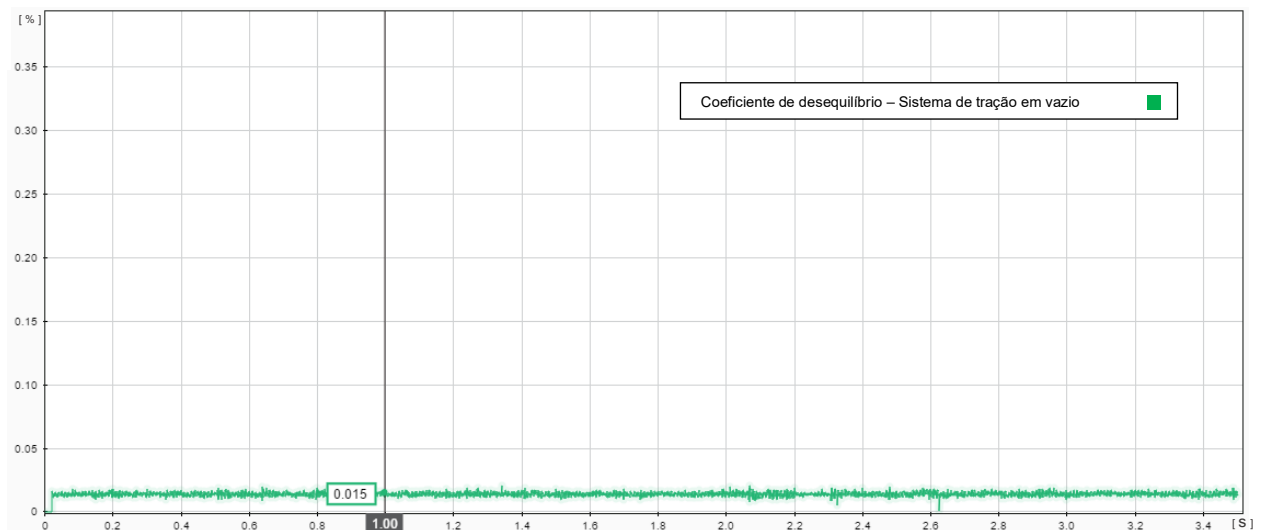


Figura 5.16 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Portimão – B3) – Cenário 1.

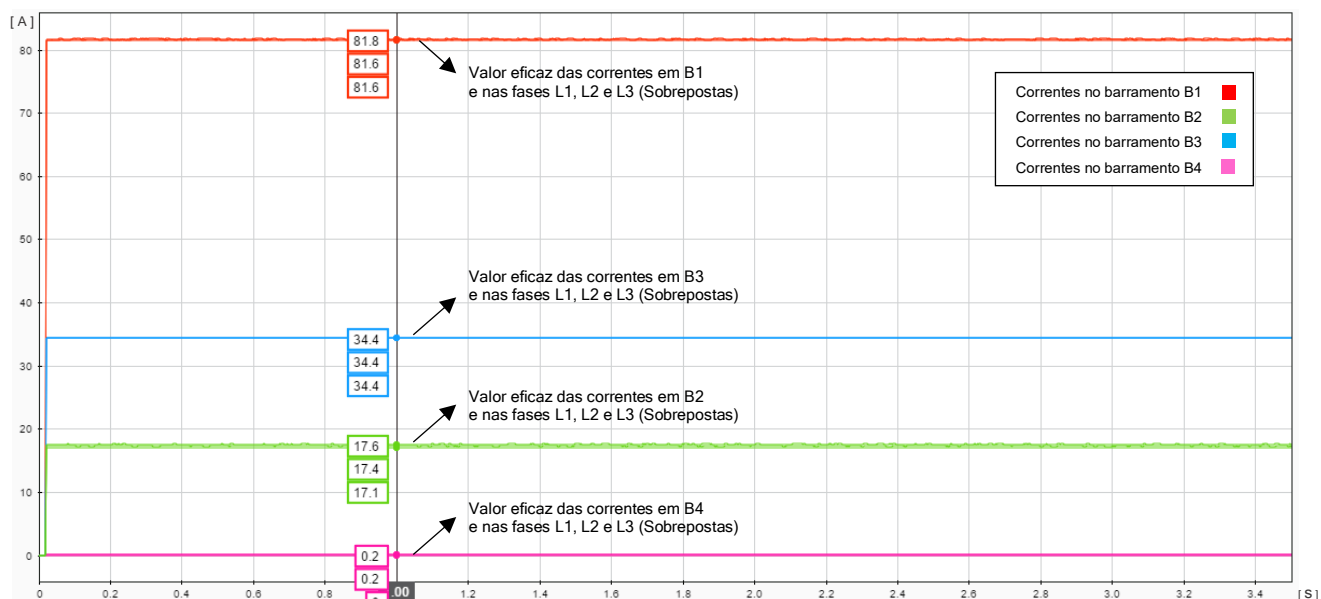


Figura 5.17 – Correntes nos barramentos de Sines (B1), Sabóia (B2), Portimão (B3) e Luzianes (B4) – Cenário 1.

Como esperado, conforme se observa pela Figura 5.17, pelo facto do sistema ferroviário se encontrar em vazio, não existe qualquer consumo de corrente na SST de Luzianes. As correntes existentes são relativas às cargas aplicadas à saída das subestações de Sines e Portimão. Face ao sistema de transmissão se encontrar construído em anel, verifica-se a distribuição das correntes de 81.8 A, 34.4 A, 17.4 A e 0 A respetivamente pelos barramentos de Sines, Portimão, Sabóia e Luzianes.

5.2.2.2. CENÁRIO 2

O objetivo deste cenário é verificar o comportamento da rede tração elétrica e eventuais desequilíbrios na rede trifásica de transmissão. Neste cenário, conforme se observa pela Figura 5.18, foi simulada uma locomotiva da série 5601 em movimento com potência constante a deslocar-se no sentido descendente desde a zona neutra de São Marcos até a zona neutra do Montenegro, passando sensivelmente a meio percurso pela SST de Luzianes. A locomotiva percorrerá 26,75 km entre a ZN de São Marcos e a SST de Luzianes e 33,91 km entre a SST e a ZN do Montenegro. A locomotiva, deslocando-se com uma velocidade constante de 80 km/h (zona de potência nominal da carga) levará cerca de 45 minutos e 30 segundos para efetuar esse percurso. Pelo processo moroso e pesado em termos de simulação do MATLAB/SIMULINK, este trajeto equivalerá a um tempo de 2,15 segundos (cerca de 20 minutos de processamento computacional). A simulação inicia-se aos 0 segundos, a carga entra na zona neutra de São Marcos (secção elementar 6) aos 0,05 segundos, sai da zona neutra do Montenegro (secção elementar 3) aos 2,2 segundos terminando a simulação aos 2,4 segundos.

Observando a Figura 5.19, verifica-se que os valores da tensão na geração são os esperados, nomeadamente 150 kV de valor eficaz da tensão composta e respetivo valor de pico de 212 kV. Pela análise da Figura 5.20 e Figura 5.21, conforme esperado, verifica-se que a corrente na fase B é nula pelo facto da SST ter alimentação bifásica pelas fases A e C. Em sistemas trifásicos equilibrados, o desfasamento entre correntes é de 120° , contudo neste sistema, face à alimentação bifásica, o transformador da SST cria um efeito de oposição nestas mesmas fases originando um desfasamento de 180° entre correntes. Pode-se observar na Figura 5.20 a existência de variações em patamares das correntes sendo que estas ocorrem devido à comutação dos interruptores que simulam o movimento do comboio. Na realidade as correntes não são observáveis desta forma, existindo uma variação gradual à medida que os comboios se afastam/aproximam das SST.

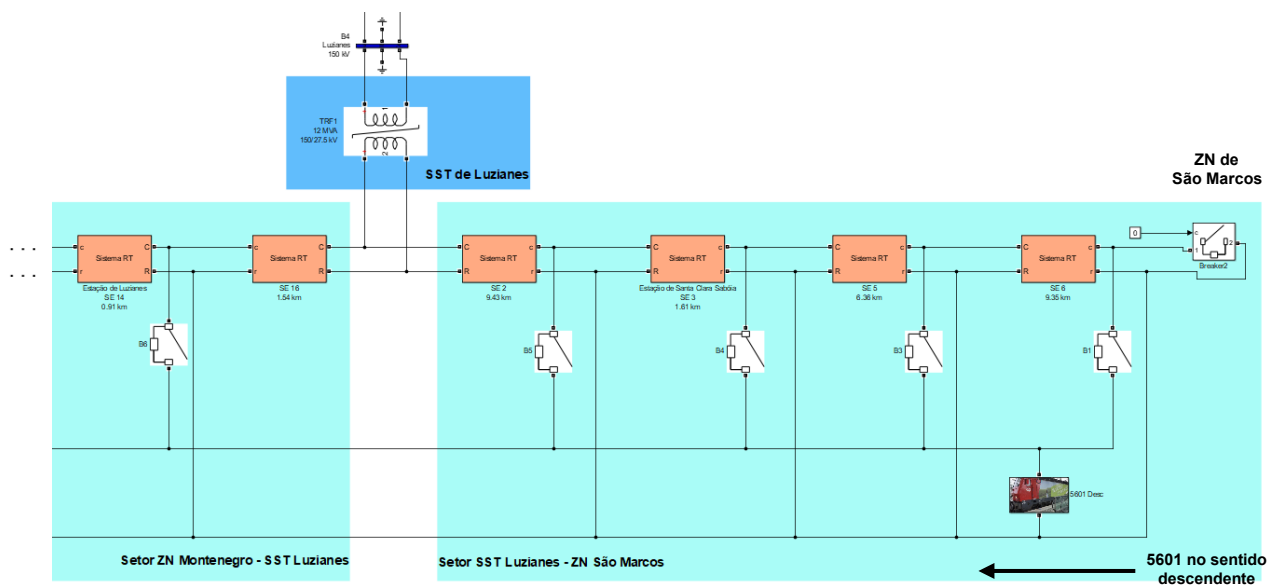


Figura 5.18 – Simulação do sistema de 1x25 kV com uma carga móvel – Cenário 2.

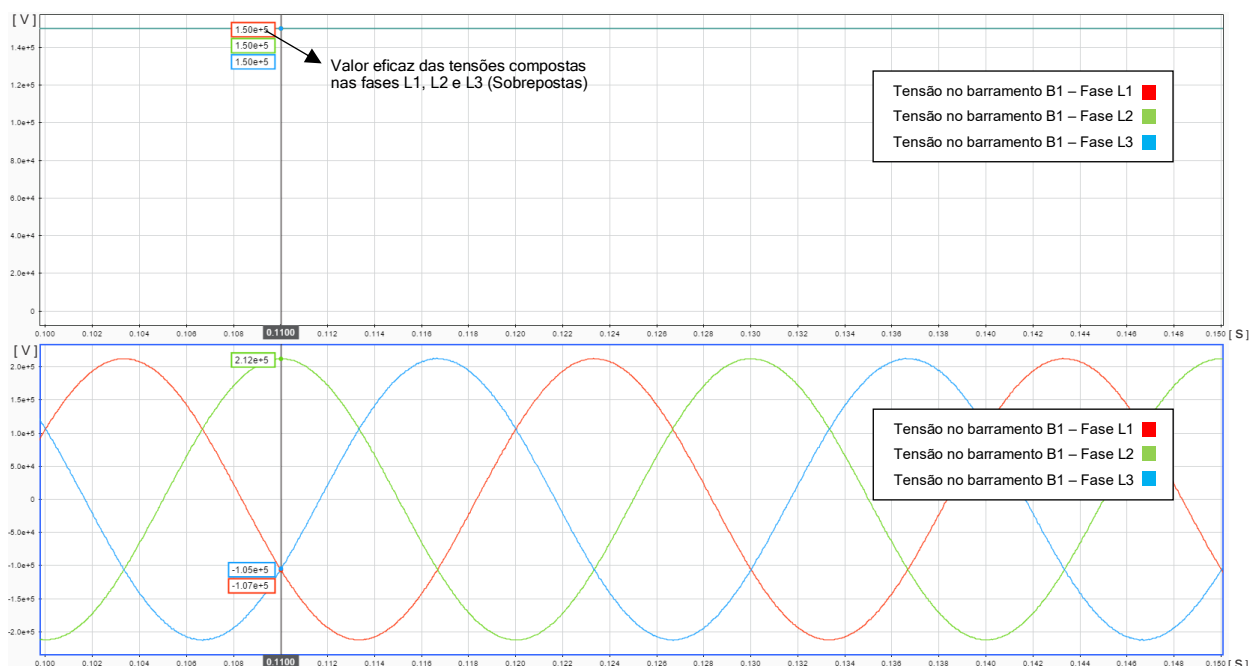


Figura 5.19 – Tensões na geração (Barramento de Sines - B1) – Cenário 2.

Topo: Evolução do valor eficaz das tensões compostas; Fundo: Evolução instantânea das tensões compostas.

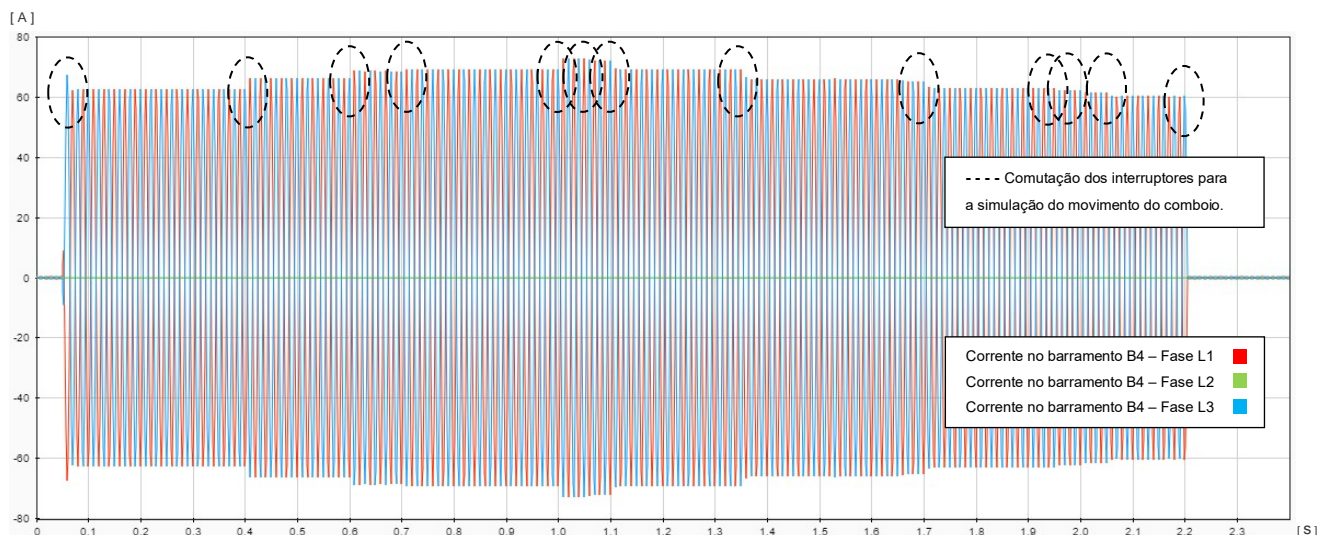


Figura 5.20 – Correntes no barramento de Luzianes (B4) – Cenário 2.

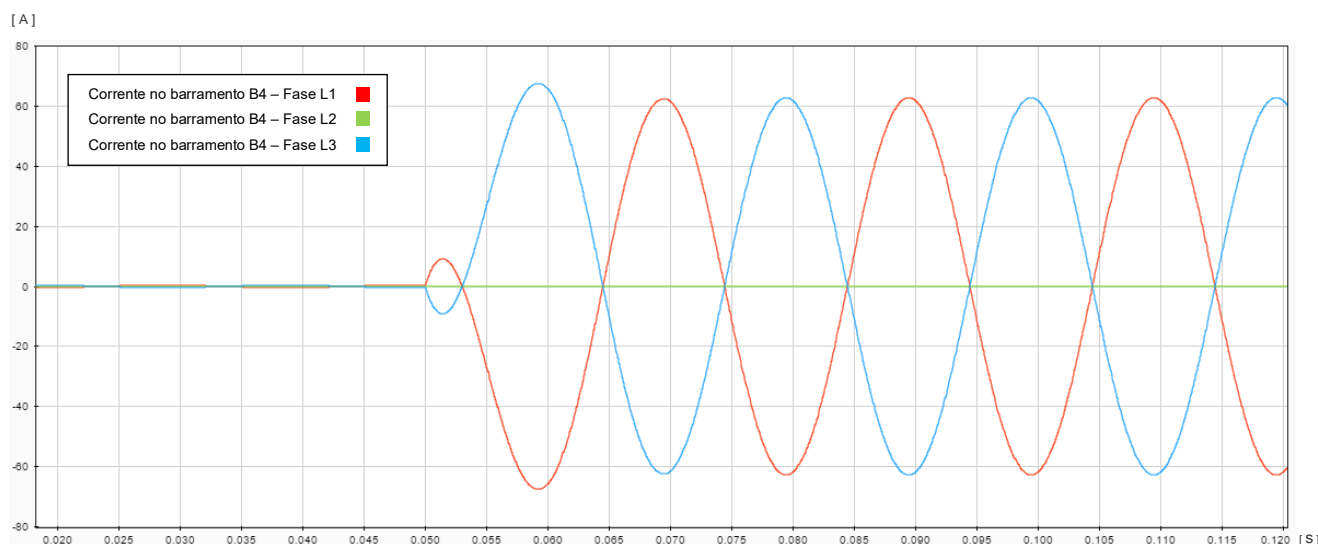


Figura 5.21 – Correntes no barramento de Luzianes (B4) – Pormenor – Cenário 2.

Na Figura 5.22 e na Figura 5.23, apresenta-se a evolução das tensões e correntes presentes no primário e secundário da SST de Luzianes assim como a tensão e corrente presente no pantógrafo da locomotiva. Com base nesses gráficos, resultantes da simulação do sistema 1x25 kV com uma carga em movimento com potência constante a deslocar-se no sentido descendente desde a zona neutra de São Marcos até a zona neutra do Montenegro, passando pela SST de Luzianes, elaborou-se a Tabela 6 com a anotação das tensões e correntes ao longo trajeto da locomotiva. É possível verificar que a tensão no primário da SST sofre apenas um decréscimo de 1% em relação à tensão de referência em vazio (150 kV) oscilando entre os 148,27 kV junto da SST e 148,78 kV no ponto mais distante do setor, junto da ZN de Montenegro, que se encontra a 33,91 km da SST.

Relativamente à tensão no secundário da SST, face à potência da carga aplicada sofre um decréscimo de cerca de 7% em relação à tensão de referência em vazio (27,5 kV) oscilando entre os 25,31 kV e 25,45 kV, junto da SST e no ponto mais distante do setor respetivamente. No que diz respeito à tensão no pantógrafo da locomotiva sofre um decréscimo entre 0,4% a 17% em relação à tensão nominal (25 kV) oscilando entre os 24,91 kV junto da SST e 20,63 kV no ponto mais distante do setor. Este decréscimo mostra que à medida que a locomotiva se afasta da SST, a impedância da rede de tração aumenta originando uma redução no perfil da tensão da carga de tração.

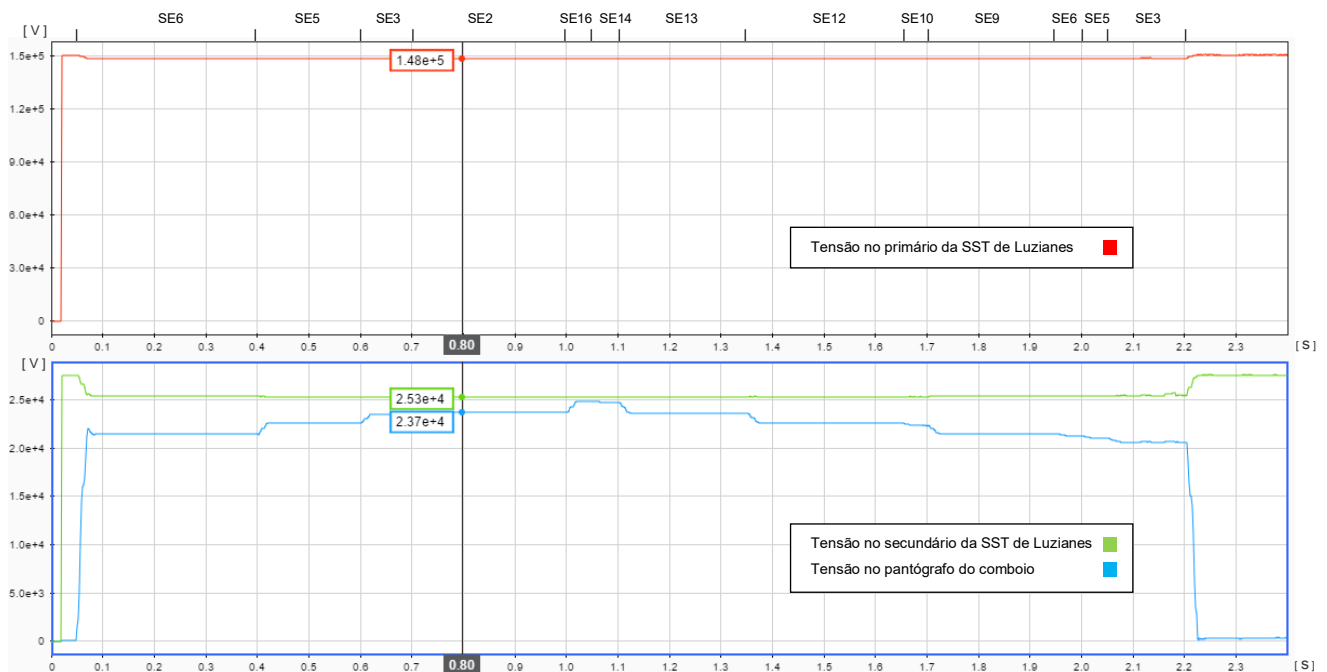


Figura 5.22 – Tensão no primário e secundário da SST e no pantógrafo do comboio – Cenário 2.

Tabela 6 – Tensões e correntes no primário e secundário da SST e no pantógrafo do comboio – Cenário 2.

		ZN Montenegro						SST Luzianes					ZN São Marcos				
		FUN			AMO			LUZ					SCS				
		SE3	SE5	SE6	SE9	SE10	SE12	SE13	SE14	SE16	SE2	SE3	SE5	SE6			
		Locomotiva 5601															
		2,2 segundos														0,05 segundos	
		← Circulação ferroviária Sentido descendente															
Tensões [kV]		Referência															
SST Primário	150,00	148,78	148,72	148,69	148,65	148,52	148,49	148,38	148,28	148,27	148,38	148,39	148,49	148,63			
SST Secundário	27,50	25,45	25,42	25,42	25,40	25,37	25,36	25,34	25,32	25,31	25,33	25,34	25,37	25,41			
Carga 1	25,00	20,63	21,03	21,30	21,52	22,35	22,61	23,65	24,74	24,91	23,73	23,50	22,65	21,47			
Correntes [A]		Referência															
SST Primário	80,0	42,6	43,4	44,0	44,4	46,2	46,7	48,8	51,0	51,4	48,9	48,5	46,7	44,3			
SST Secundário	436,0	231,3	235,6	238,8	241,0	250,4	253,2	264,8	277,1	278,3	265,7	263,2	253,6	240,4			
Carga 1	320,0	231,3	235,6	238,8	241,0	250,4	253,2	264,8	277,1	278,3	265,7	263,2	253,6	240,4			

É possível observar que as correntes no primário da SST oscilam entre os 42,6 A e 51,4 A, verificando-se que a SST de Luzianes se encontra entre 53,3% e 64,3% da sua capacidade máxima (80 A) quando circula um comboio nos setores alimentados por esta SST num regime de carga constante e permanente. É possível verificar e comprovar que no sistema 1x25 kV toda a corrente que sai da SST pela catenária, retorna na sua totalidade pelo sistema de RCT à SST. Desta forma as correntes que circulam na catenária e no sistema RCT são idênticas. Observando a Figura 5.24, verifica-se ligeiro desequilíbrio provocado pela carga monofásica de tração (comboio) à rede trifásica de alimentação, tendo o coeficiente de desequilíbrio um valor máximo de 0,56% no barramento de Portimão.

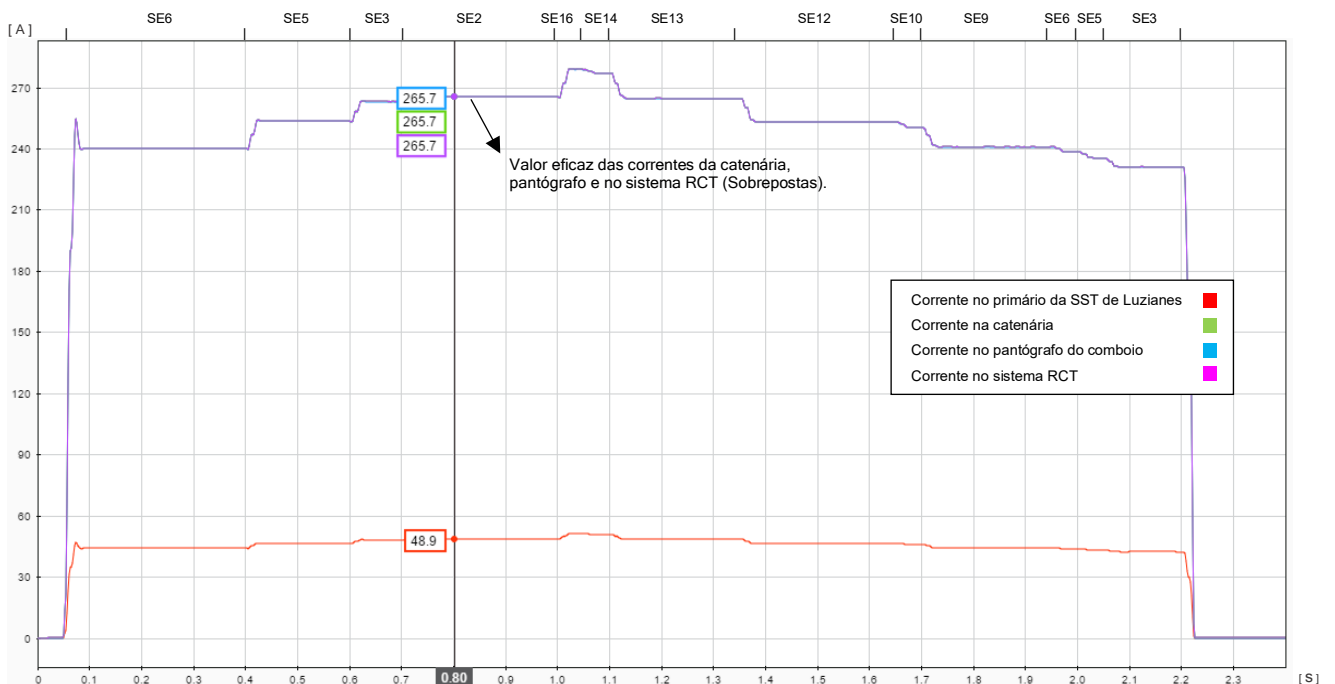


Figura 5.23 – Correntes no primário da SST e secundário da SST (catenária, RCT e carga) – Cenário 2.

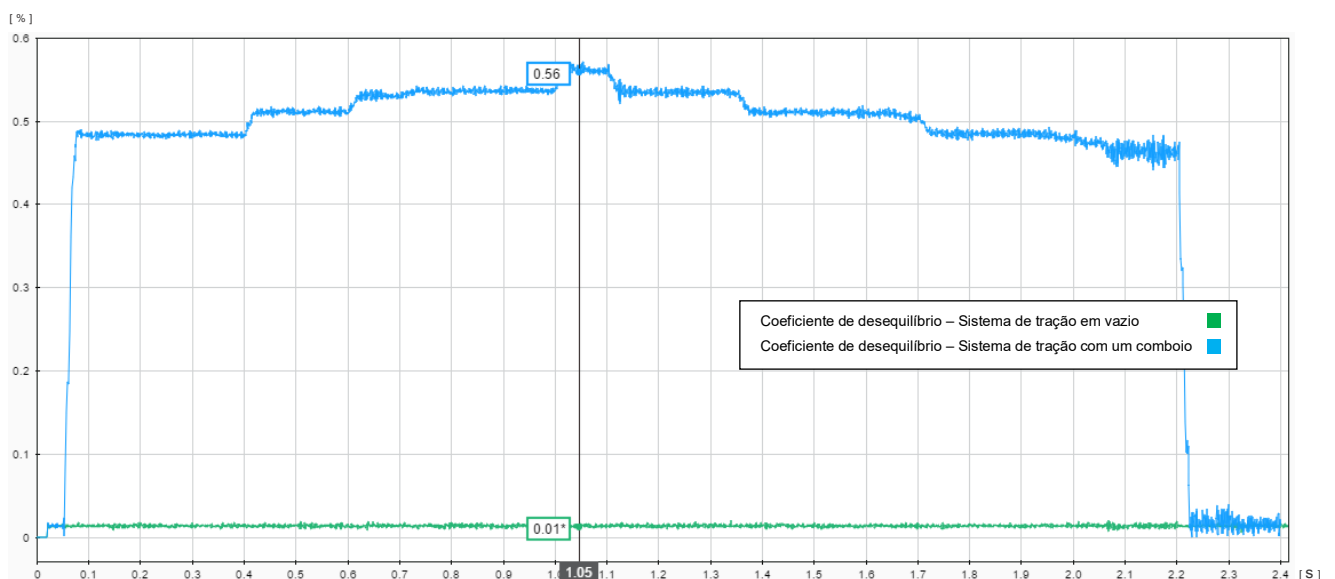


Figura 5.24 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Portimão – B3) – Cenário 2.

5.2.2.3. CENÁRIO 3

O objetivo deste cenário é idêntico ao exposto para o cenário 2, mas empregando na simulação duas cargas móveis de potência constante. Será verificado o comportamento da rede tração elétrica e eventuais desequilíbrios na rede trifásica de transmissão. Neste cenário, conforme se observa pela Figura 5.25, foi simulada uma locomotiva da série 5601 a deslocar-se no sentido descendente desde a zona neutra de São Marcos até a zona neutra do Montenegro e uma automotora da série 4001 a deslocar-se em sentido oposto à locomotiva, ou seja, a deslocar-se no sentido ascendente desde a zona neutra do Montenegro até à zona neutra de São Marcos, ambas com potência constante e passando sensivelmente a meio percurso pela SST de Luzianes. Cada comboio percorrerá 60,66 km entre as ZN definidas, deslocando-se com uma velocidade constante de 80 km/h (zona de potência nominal da carga) levando cerca de 45 minutos e 30 segundos para efetuar esse percurso, correspondendo cada trajeto a um tempo de simulação de 2,15 segundos.

A simulação inicia-se aos 0 segundos, a locomotiva 5601 entra na ZN de São Marcos (secção elementar 6) aos 0,05 segundos e sai da ZN do Montenegro (secção elementar 3) aos 2,2 segundos. A automotora 4001 inicia a sua marcha na ZN do Montenegro aos 1,15 segundos e sai da ZN de São Marcos aos 3,3 segundos. Os comboios irão cruzar aos 1,7 segundos na estação das Amoreiras (secção elementar 19). A simulação termina aos 3,5 segundos. Neste cenário existem três situações distintas; inicialmente só o comboio 5601 se encontra a circular, depois dá-se a entrada do segundo comboio (4001), ficando dois comboios em marcha e finalmente o comboio 5601 sai do setor considerado na simulação ficando apenas a circular o comboio 4001. Observando a Figura 5.26, verifica-se que, à semelhança dos cenários 1 e 2, quando no sistema ferroviário se deslocam duas cargas de tração, os valores de tensão na geração é de 150 kV de valor eficaz da tensão composta e respetivo valor de pico de 212 kV.

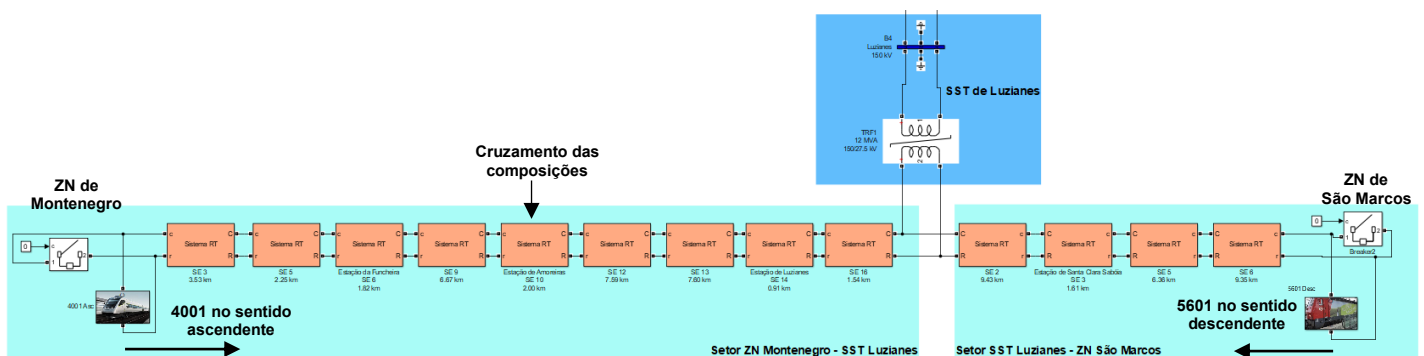


Figura 5.25 – Simulação do sistema de 1x25 kV com duas cargas móveis – Cenário 3.

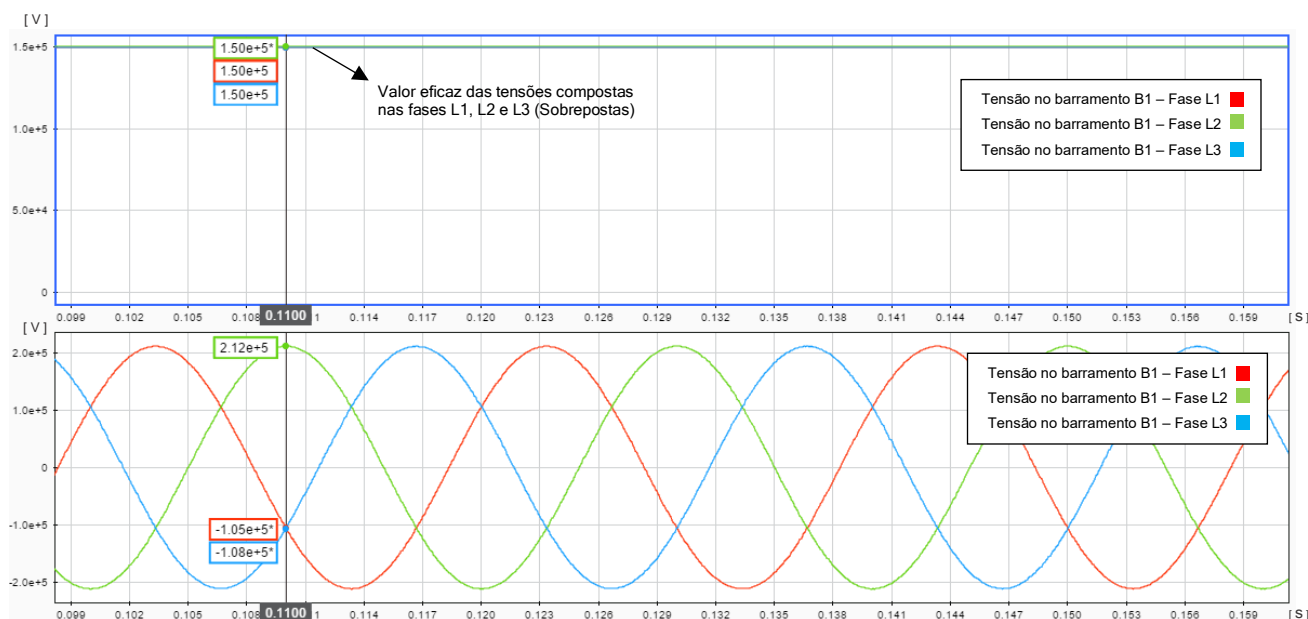


Figura 5.26 – Tensões na geração (Barramento de Sines - B1) – Cenário 3.
 Topo: Evolução do valor eficaz das tensões compostas; Fundo: Evolução instantânea das tensões compostas.

Na Figura 5.27 e Figura 5.28 apresenta-se a evolução das tensões e correntes presentes no primário e secundário da SST de Luzianes assim como as tensões e correntes presentes nos pantógrafos dos comboios. Com base no gráfico da Figura 5.27, resultante da simulação do sistema 1x25 kV com duas cargas em movimento com potência constante a deslocar-se, uma locomotiva da série 5601 no sentido descendente desde a zona neutra de São Marcos até a zona neutra do Montenegro e uma automotora da série 4001 no sentido ascendente entre a zona neutra de São Marcos e a zona neutra do Montenegro, passando pela SST de Luzianes, elaborou-se a Tabela 7 com a anotação das tensões e correntes ao longo trajeto dos comboios.

É possível verificar que a tensão no primário da SST sofre um decréscimo de 1% a 2% em relação à tensão de referência em vazio (150 kV) oscilando entre os 147,10 kV e 149,06 kV. Relativamente à tensão no secundário da SST, face à potência das cargas aplicadas, esta sofre um decréscimo entre 5% a 12% em relação à tensão de referência em vazio (27,5 kV) oscilando entre os 24,21 kV e 26,08 kV. No que diz respeito à tensão no pantógrafo nas locomotivas, estas sofrem um decréscimo entre 0,4% e 36% em relação à tensão nominal (25 kV) oscilando entre os 24,90 kV junto da SST e 15,94 kV. Este decréscimo mostra que à medida que os comboios se afastam da SST, a impedância da rede de tração aumenta originando uma redução no perfil da tensão da carga de tração. Os valores máximos dos decréscimos são menores em relação ao cenário 2 (148,78 kV vs. 149,06 kV | 25,45 kV vs. 26,08 kV | 24,91 kV vs. 25,60 kV) pelo facto de em determinado instante estar a circular apenas o comboio da série 4001, sendo este menos potente em relação ao comboio da série 5601.

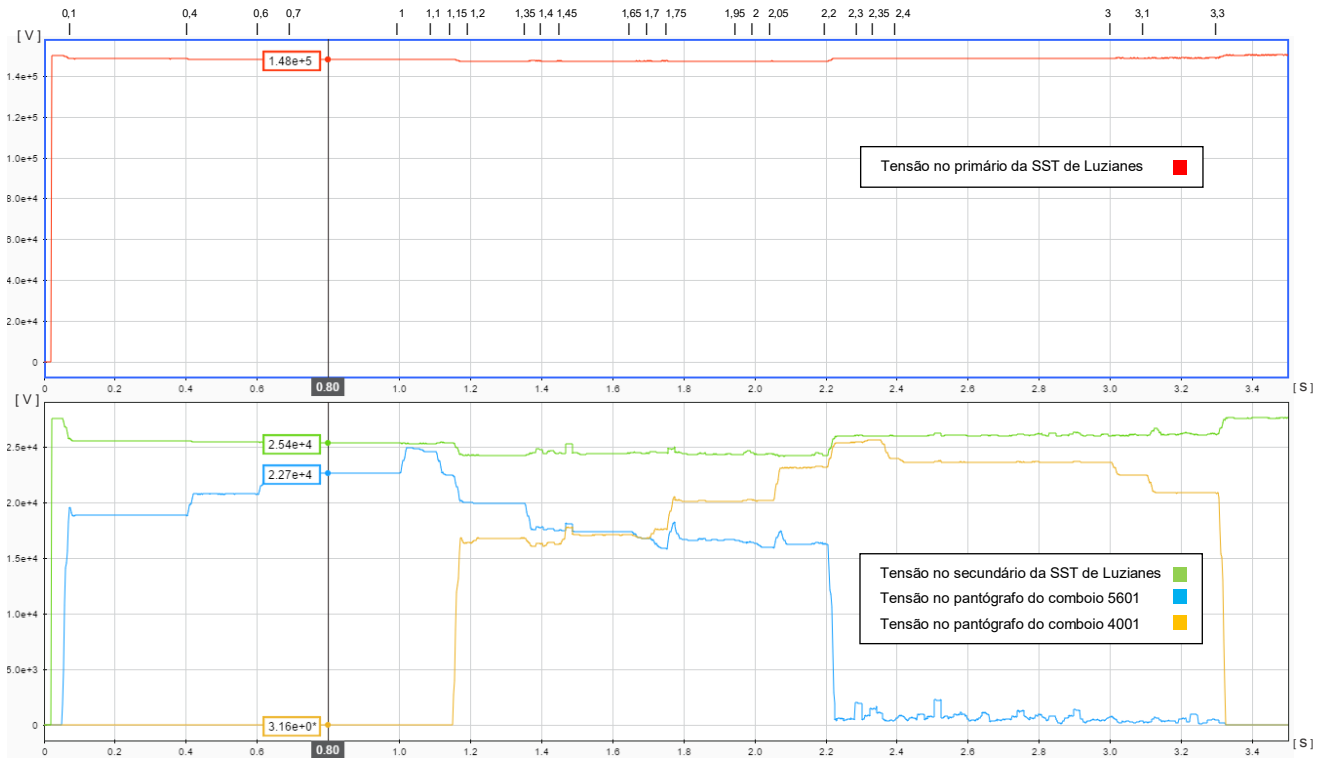


Figura 5.27 – Tensões no primário e secundário da SST e nos pantógrafos dos comboios – Cenário 3.

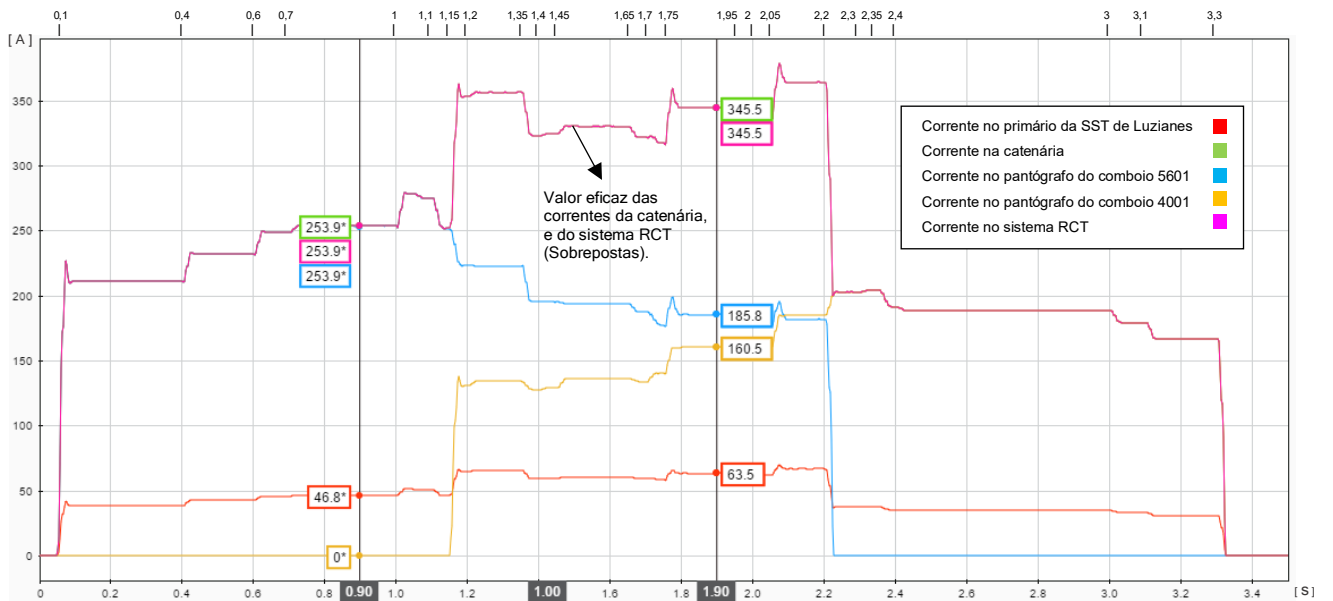


Figura 5.28 – Correntes no primário e secundário da SST (catenária, carril e cargas) – Cenário 3.

É possível observar que as correntes no primário da SST oscilam entre os 30,8 A e 67,0 A, verificando-se que a SST de Luzianes se encontra entre 38,5% e 83,8% da sua capacidade máxima (80 A) quando circulam dois comboios nos setores alimentados por esta SST num regime de carga constante e permanente. À semelhança do cenário 2, verifica-se que no sistema 1x25 kV toda a corrente que sai da SST pela catenária, retorna na sua totalidade pelo sistema de RCT à SST. Desta forma comprova-se que as correntes que circulam na catenária e no sistema RCT são idênticas.

Tabela 7 – Tensões e correntes no primário e secundário da SST e nos pantógrafos dos comboios – Cenário 3 – 1x25 kV.

0,05 segundos	1,15 segundos	2,2 segundos	3,3 segundos
1 comboio	2 comboios		1 comboio
Locomotiva 5601	Locomotiva 5601 e Automotora 4001		Automotora 4001

Tensões [kV]	Referência																								
SST Primário	150,00	148,62	148,49	148,39	148,36	148,27	148,27	147,44	147,22	147,25	147,25	147,32	147,33	147,33	147,16	147,19	147,24	147,10	148,87	148,93	148,93	148,95	149,00	149,06	
SST Secundário	27,50	25,56	25,45	25,38	25,37	25,32	25,31	24,29	24,21	24,50	24,42	24,44	24,44	24,77	24,45	24,44	24,33	24,28	25,98	25,95	26,00	26,03	26,04	26,08	
Carga 1	25,00	18,86	20,77	22,26	22,67	24,90	24,58	20,01	19,99	17,60	17,48	17,42	17,41	16,24	16,74	16,42	15,94	16,30							
Carga 2	25,00							16,39	16,81	16,10	16,23	17,12	17,11	17,84	20,19	20,22	20,17	23,19	25,42	25,60	24,77	23,66	22,46	20,88	

Correntes [A]	Referência																								
SST Primário	80,0	38,9	42,9	46,2	46,8	51,3	49,4	64,9	65,6	59,5	59,8	60,9	59,3	58,9	63,5	63,0	62,3	67,0	37,5	37,8	35,4	34,9	33,1	30,8	
SST Secundário	436,0	211,2	232,6	249,4	253,9	278,6	268,4	353,1	356,9	322,3	324,9	330,8	322,2	320,2	345,5	342,5	338,8	364,5	203,2	204,8	192,2	189,1	179,5	166,9	
Carga 1	320,0	211,2	232,6	249,4	253,9	278,6	268,4	223,5	223,2	195,7	195,4	194,4	187,9	180,0	185,8	182,6	178,7	182,1							
Carga 2	320,0							130,6	134,4	127,8	129,6	136,5	134,2	140,4	160,5	160,9	161,4	185,0	203,2	204,8	192,2	189,1	179,5	166,9	

Observando a Figura 5.29, verifica-se um aumento no desequilíbrio provocado pelas cargas monofásicas de tração (comboio 5601 e comboio 4001) à rede trifásica de alimentação, atingindo o coeficiente de desequilíbrio um valor máximo de 0,75% no barramento de Portimão.

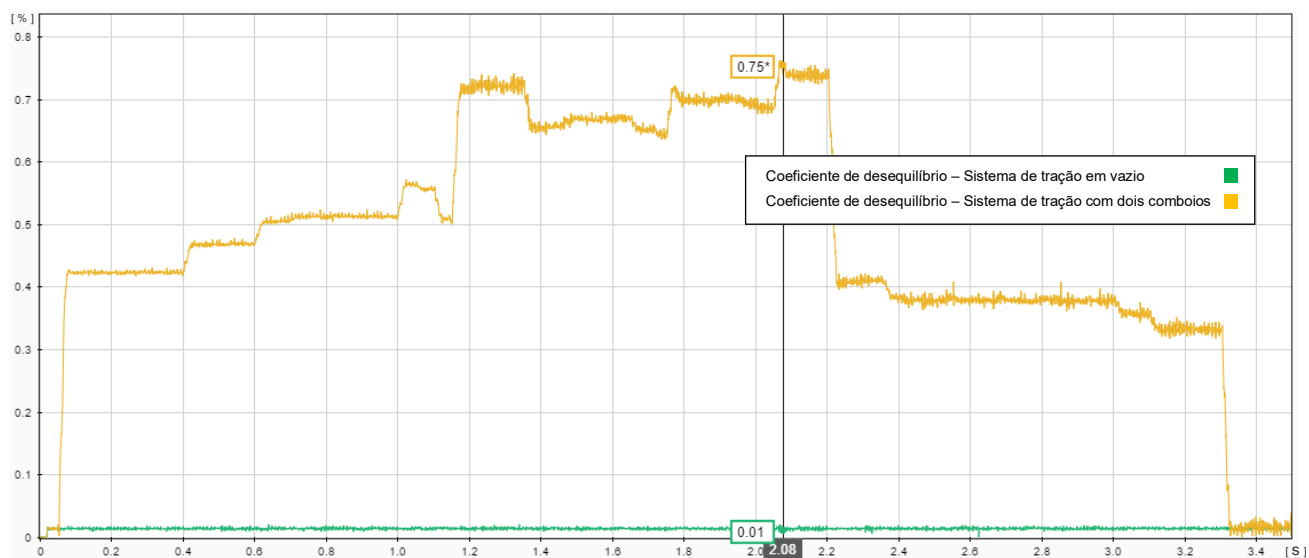


Figura 5.29 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Portimão – B3) – Cenário 3.

5.2.2.4. CENÁRIO 4

O objetivo deste cenário é verificar o comportamento da rede tração e da rede trifásica de transmissão no que diz respeito a eventuais perturbações quando surgem falhas na rede de tração. Este cenário foi simulado com base no cenário 2 mas apenas para 0,4 segundos de simulação, ou seja, quando a carga se encontra na secção elementar 6 após ter passado a zona neutra de São Marcos e antes de chegar à secção elementar 5. Para o efeito, foi simulada uma falha de curto-circuito (com $R_{Falha}=0,001\Omega$) na rede de tração envolvendo uma fase (catenária - carril) junto da secção elementar 6 na zona neutra de São Marcos. Modelou-se esta falha com início aos 0,1 segundos e duração de 30, 50 e 180 milissegundos. Na Figura 5.30, apresenta-se a evolução das tensões e correntes presentes no primário da SST de Luzianes assim como a evolução das tensões e correntes presentes no pantógrafo da locomotiva. Pode-se observar pelas formas de onda simuladas que, quando ocorre uma falha de curto-circuito entre a catenária e o carril, a rede de transmissão sofre diversas alterações, nomeadamente na tensão de alimentação:

- 30ms – Não existe alteração na tensão de alimentação, mas ocorre uma ligeira subcorrente;
- 50ms – Ligeira Subtensão – passa de 148 kV para 144 kV;
- 180ms – Ligeira Subtensão – passa de 148 kV para 143 kV.

A tensão da rede de tração sofre as seguintes perturbações:

- 30ms – Ligeira Subtensão – passa de 21,5 kV para 21,1 kV;
- 50ms – Diminuição brusca de tensão – passa de 21,5 kV para 9,05 kV;
- 180ms – Queda abrupta de tensão – passa de 21,5 kV para 10 V.

Com base nestes valores, verifica-se que quando ocorre uma falha de curto-circuito franco assimétrico na rede de tração envolvendo uma fase (catenária - carril) com uma duração igual ou superior a 50 milissegundos, o sistema de tração é afetado criticamente comprometendo a circulação ferroviária. Este tipo de perturbação na rede de tração com uma duração igual ou superior a 50 milissegundos afeta ligeiramente a rede trifásica de transmissão provocando as sobrecorrentes observadas na Figura 5.30. Com base na Figura 5.31, verifica-se um aumento significativo no desequilíbrio provocado pela carga de tração à rede trifásica de alimentação, passando o coeficiente de desequilíbrio no barramento de Portimão, de um valor de 0,48% em regime nominal para um máximo de 1,74% devido a esta perturbação.

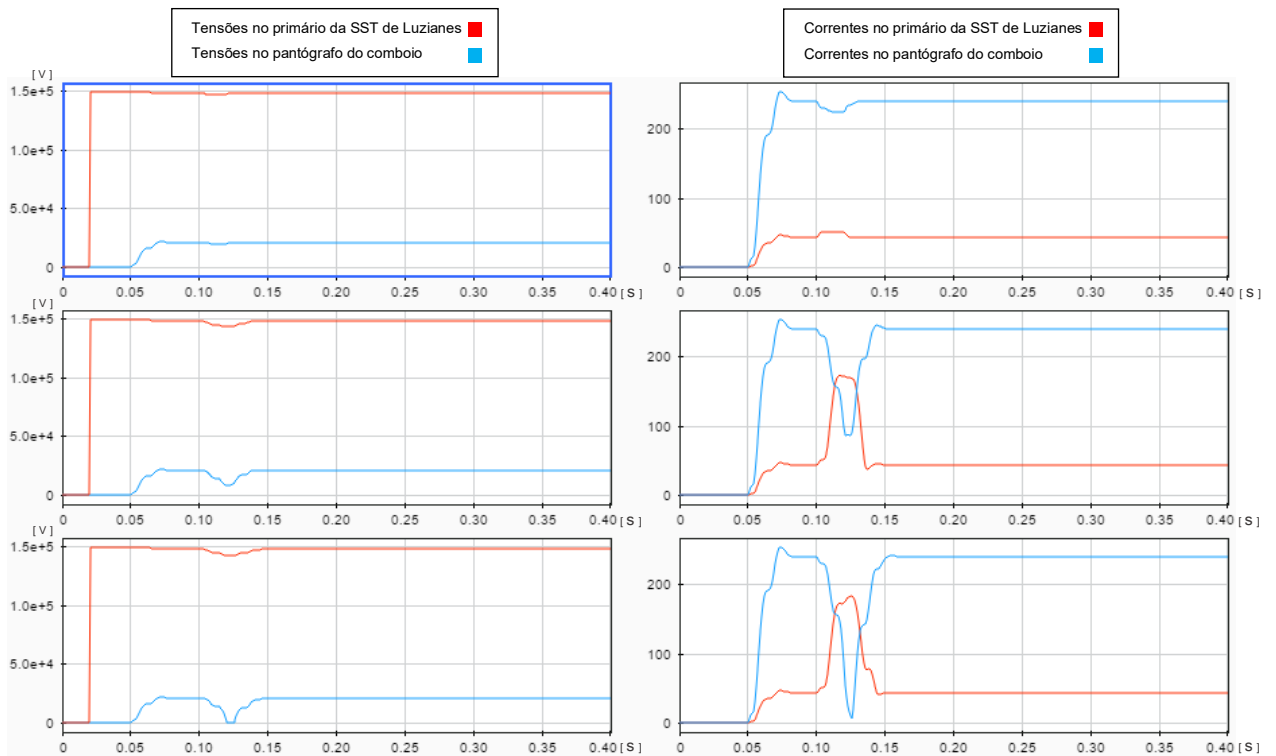


Figura 5.30 – Curto-circuito catenária-carril de 30ms, 50ms e 180ms – Cenário 4.

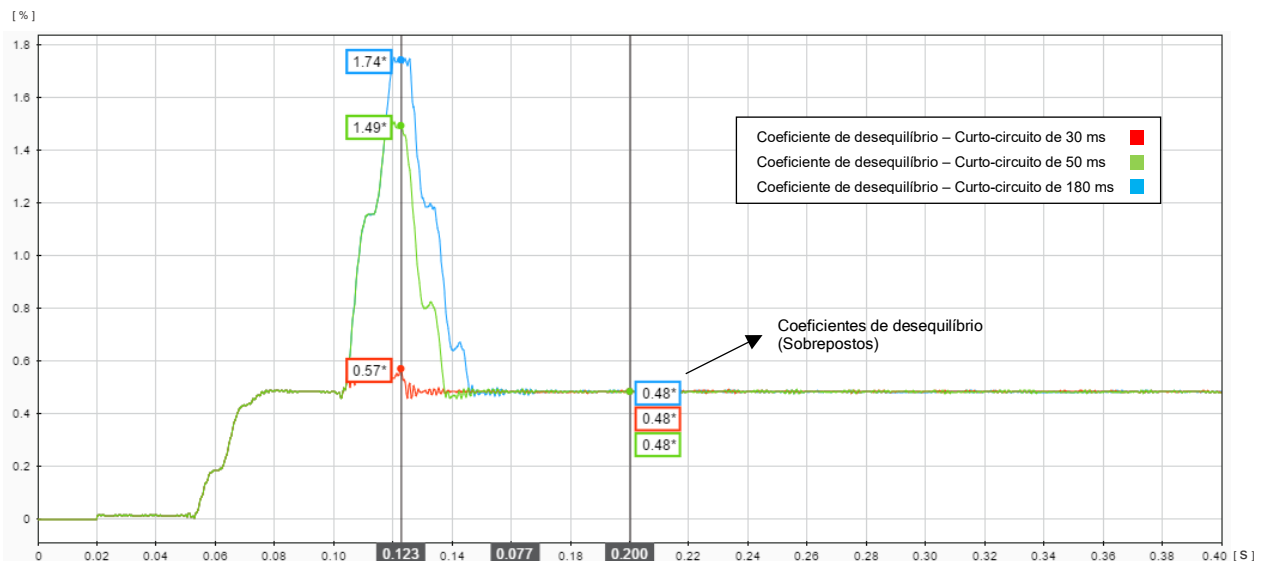


Figura 5.31 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Portimão – B3) – Cenário 4.

5.3. MODELAÇÃO DO SISTEMA 2x25 kV

Com base no diagrama de rede representado na Figura 5.2, foi elaborado o modelo em ambiente Matlab/Simulink, conforme se representa na Figura 5.32. Para a modelação deste cenário, com base nos mapas da RNT de eletricidade e diagrama unifilar de transito da RNT [24], foi escolhida como origem de produção de energia, a central hídrica do Pocinho. A rede de transmissão é constituída por linhas de transmissão do tipo Zebra e Aster 570 a uma tensão de 220 kV [24]. A rede de transmissão é constituída por uma linha de transmissão “linha 1-2” entre a subestação do Pocinho e a subestação de Chafariz e uma linha de transmissão “linha 2-3” entre a subestação de Chafariz e a subestação de Ferro. A partir da subestação de Ferro segue o ramal de alimentação “linha 3-4” que irá alimentar a SST da Fatela transformando a tensão da rede de transmissão de 220 kV para as características necessárias ao fornecimento de energia elétrica ao material circulante através da catenária a 25 kV. Os setores de catenária, com base no esquema longitudinal de catenária de Fatela (anexo VII) foram subdivididos nas diversas secções elementares existentes. As cargas de tração inseridas nas secções elementares tiveram como base os horários e gráficos de circulação da respetiva linha de circulação ferroviária. Igualmente, tendo como base a caracterização da RNT [24], foram inseridas na rede, cargas às saídas das subestações do Pocinho, Chafariz e Ferro.

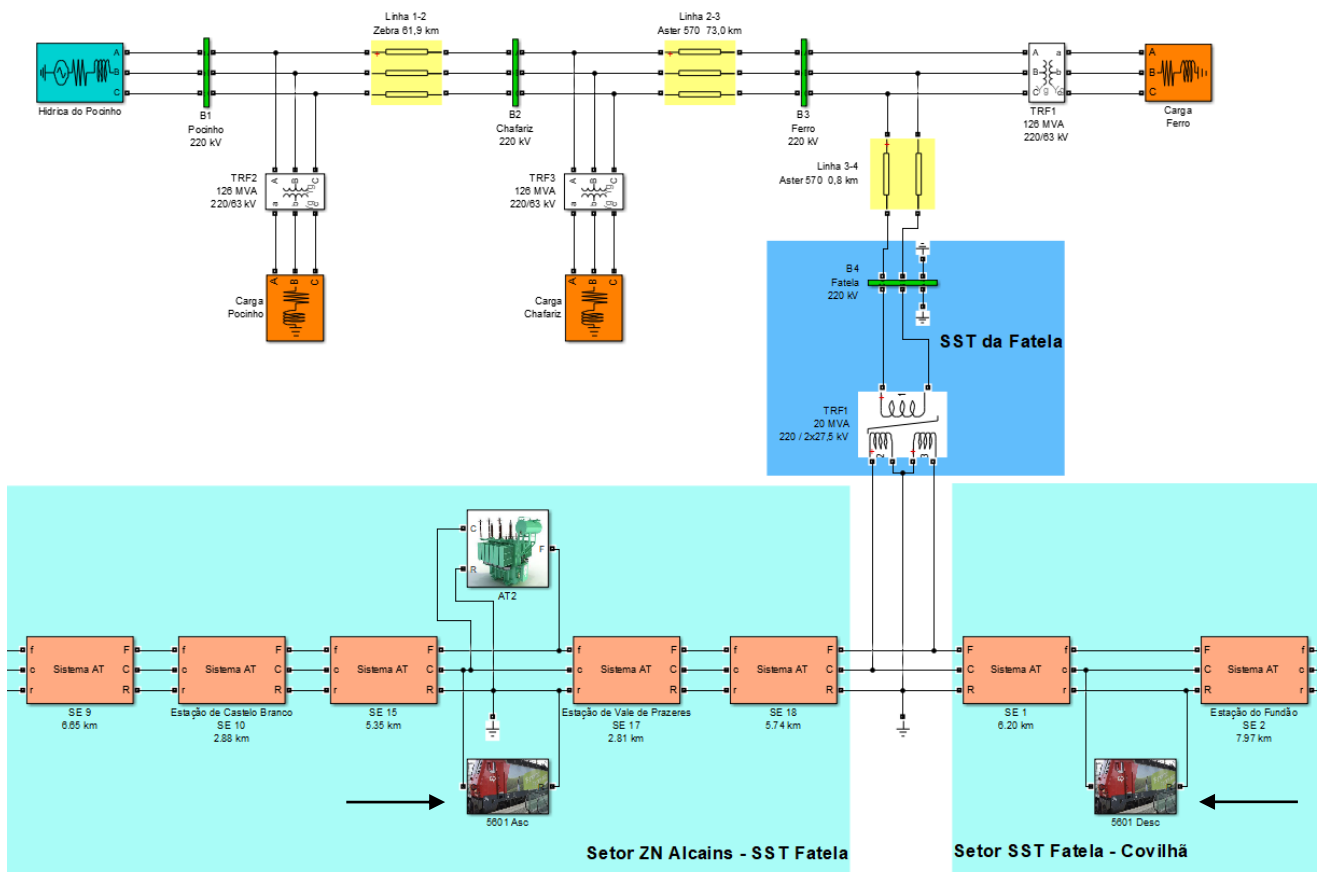


Figura 5.32 – Modelo de Matlab/Simulink para o sistema de 2x25 kV.

5.3.1. CONFIGURAÇÃO DOS BLOCOS DE SIMULAÇÃO

5.3.1.1. FONTE DE GERAÇÃO DE ENERGIA

A fonte de geração de energia adotada para o sistema 2x25 kV foi a central hídrica do Pocinho. Deste modo, para a modelação em ambiente Matlab/Simulink, utilizou-se o bloco de simulação “*Three-Phase Source – RL Branch*”. Neste bloco, com base na caracterização da RNT [24], conforme se verifica na Figura 5.33, foram definidos os parâmetros de tensão composta, frequência da rede e valor de potência de curto-circuito, sendo estes os seguintes:

$$V_{n3F} = 220 \text{ kV}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$S_{cc} = 11073 \text{ MVA}$$

5.3.1.2. LINHAS DE TRANSMISSÃO

Com base nos mapas da RNT de eletricidade, diagrama unifilar de transito da RNT e através das características elétricas das linhas de MAT especificadas na caracterização da RNT [24], sabe-se que os blocos das linhas de transmissão (linha 1-2) e (linha 2-3) são linhas trifásicas de 220 kV do tipo Zebra e Aster 570, respetivamente. Pelas características dos condutores de alumínio, geometria dos postes tipo e linhas aéreas [25] e [26] especifica-se os restantes dados para a parametrização do bloco de simulação “*Powergui – RLC Line Parameters Tool*” conforme se verifica na Figura 5.34 e Figura 5.35, nomeadamente:

Poste do tipo MT; linha simples; altura do poste de 25 m

Cabo Condutor tipo Zebra; 2,862 cm de diâmetro; Resistência elétrica de 0,0674 Ω/km

Cabo Condutor tipo Aster 570; 3,105 cm de diâmetro; Resistência elétrica de 0,0583 Ω/km

Cabo de Guarda tipo Guínea; 1,400 cm de diâmetro; Resistência elétrica de 0,3598 Ω/km

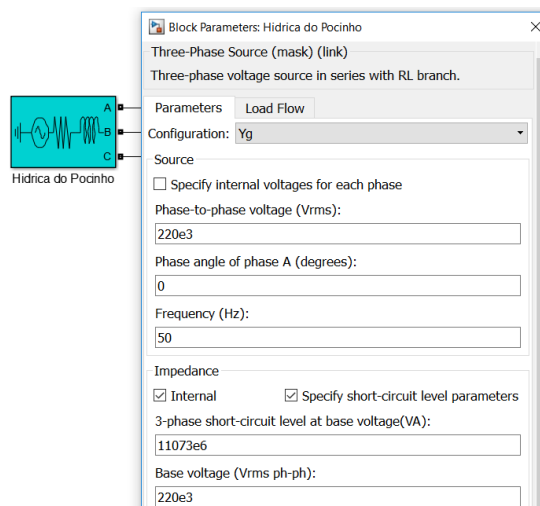


Figura 5.33 – Bloco de simulação “*Three-Phase Source – RL Branch*”.

Com os dados introduzidos no bloco de simulação da Figura 5.5, através da opção “*Compute RLC line parameters*” e pela seleção dos blocos (linha 1-3) e (linha 2-3) determinam-se os valores de resistência e indutância das linhas de transmissão, conforme se verifica na Figura 5.36, nomeadamente:

$$R_{L1-2} = 0,070635 \Omega/km$$

$$L_{L1-2} = 0,0013258 H/km$$

$$R_{L2-3} = 0,061716 \Omega/km$$

$$L_{L2-3} = 0,0013094 H/km$$

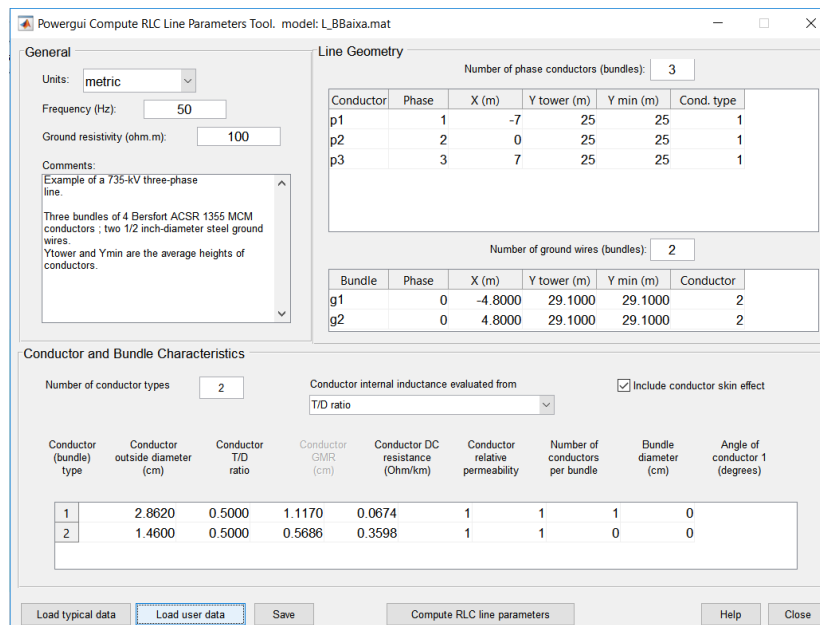


Figura 5.34 – Bloco de simulação “*Powergui – RLC Line Parameters Tool*”.

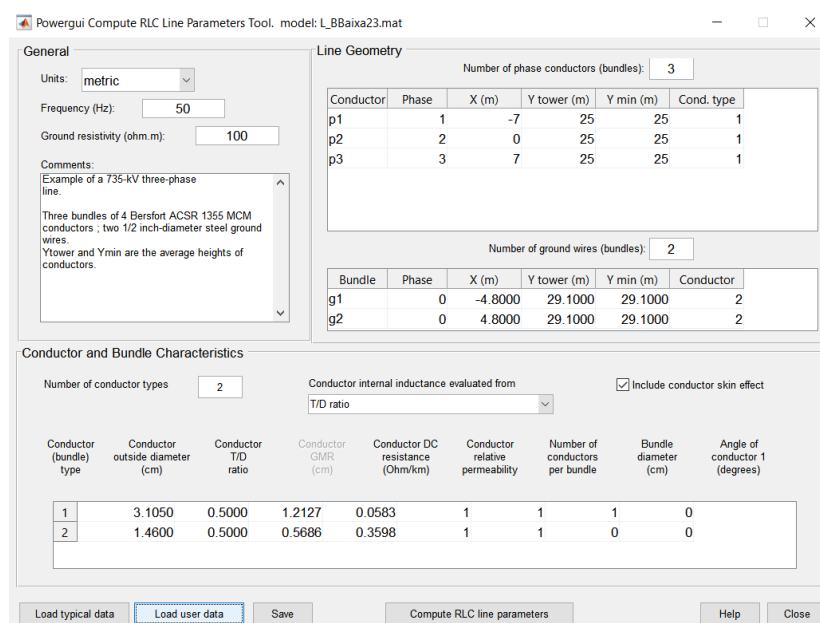


Figura 5.35 – Bloco de simulação “*Powergui – RLC Line Parameters Tool*”.

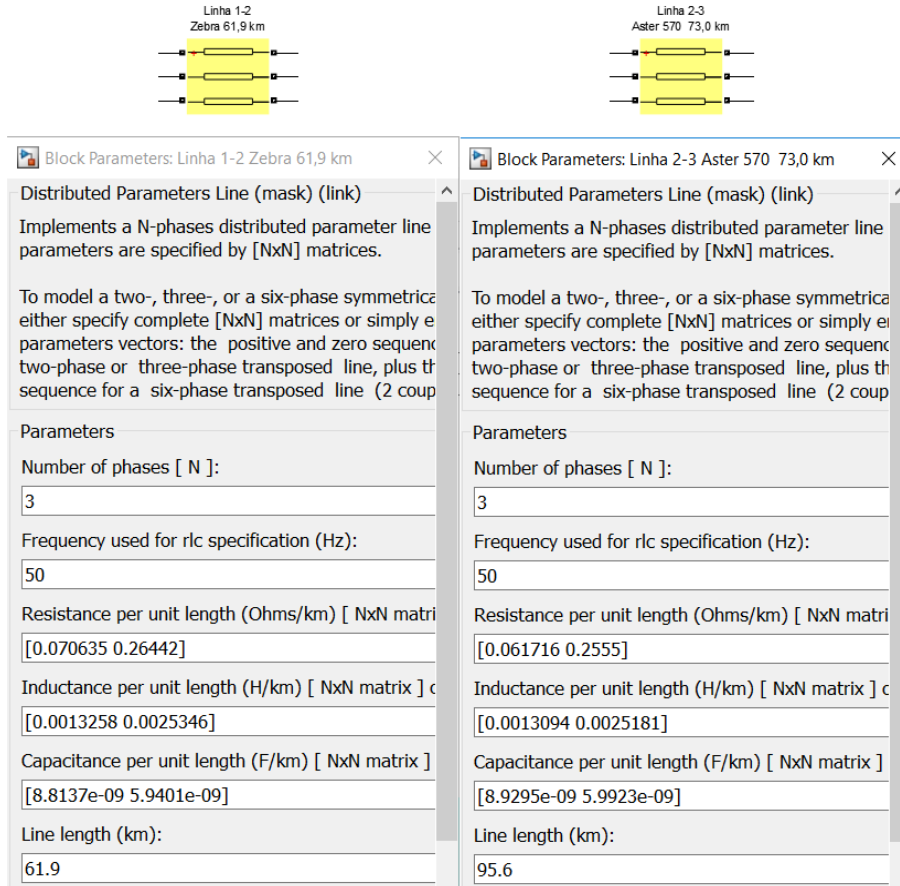


Figura 5.36 – Bloco de simulação “Distributed Parameters Line”.

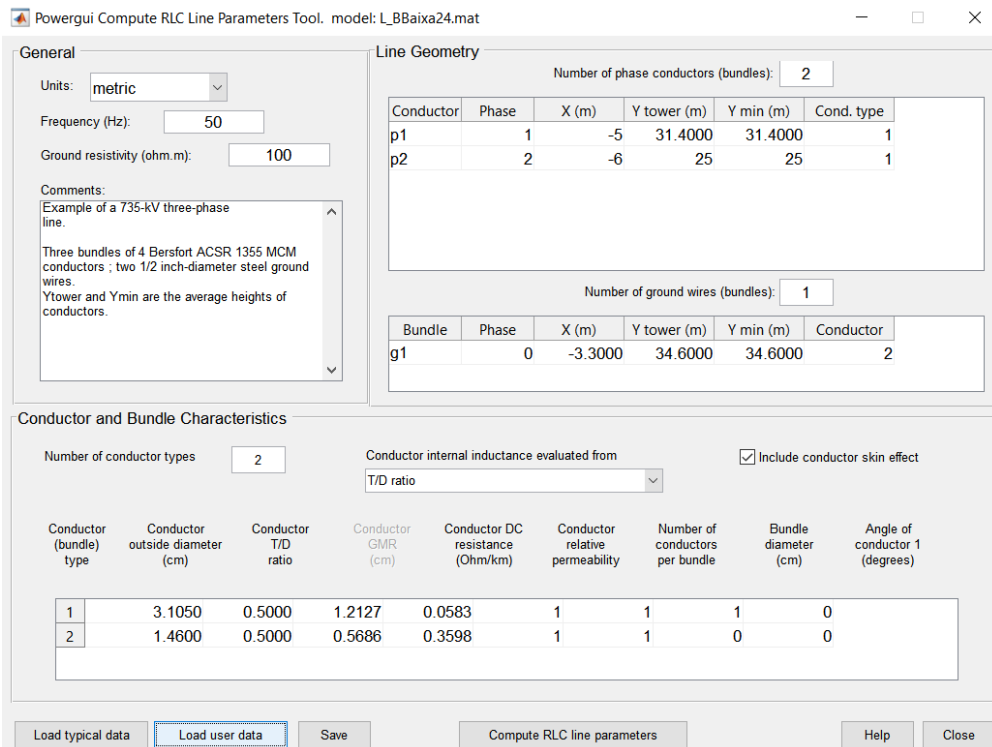


Figura 5.37 – Bloco de simulação “Powergui – RLC Line Parameters Tool”.

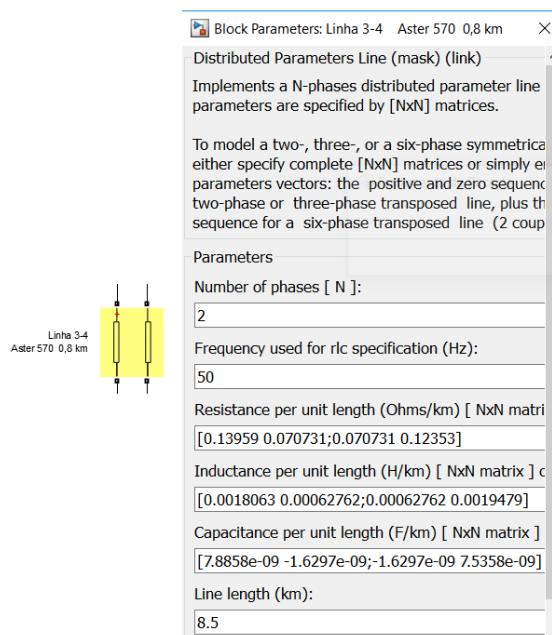


Figura 5.38 – Bloco de simulação “*Distributed Parameters Line*”.

Para a modelação da linha de transmissão entre a subestação de Ferro e a subestação de tração da Fatela, procedeu-se ao mesmo raciocínio que o descrito anteriormente, com a diferença de este ramal ser formado apenas com duas fases (linha bifásica), observando-se este parâmetro na geometria da linha no bloco de simulação da Figura 5.37. Novamente, através da opção “*Compute RLC line parameters*” e pela seleção dos blocos (linha 3-4) determinam-se os valores de resistência e indutância desta linha de transmissão, conforme se verifica na Figura 5.38, nomeadamente:

$$R_{L3-4} = 0,13959 \Omega/km$$

$$L_{L3-4} = 0,0018063 H/km$$

5.3.1.3. SUBESTAÇÃO DE TRAÇÃO

Na SST da Fatela, a tensão da rede de transmissão será transformada de 220 kV para 2x27,5 kV por forma a que a característica necessária ao fornecimento de energia elétrica ao material circulante em regime nominal através da catenária seja realizada a 25 kV. Os terminais do enrolamento secundário do transformador de potência são ligados um à catenária e outro ao feeder. Conforme referido anteriormente, o transformador possui um ponto médio no enrolamento secundário, sendo este ponto ligado ao carril, Pela observação das características do transformador de potência da SST da Fatela foram definidos, conforme se observa pelos dados do bloco de simulação da Figura 5.39, os parâmetros da potência nominal, frequência da rede e valor de tensão composta nos enrolamentos do primário e secundário do transformador, sendo estes os seguintes:

$$S_n = 20 \text{ MVA}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

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

$$V_{n2} = 27,5 \text{ kV}$$

$$V_{n3} = 27,5 \text{ kV}$$

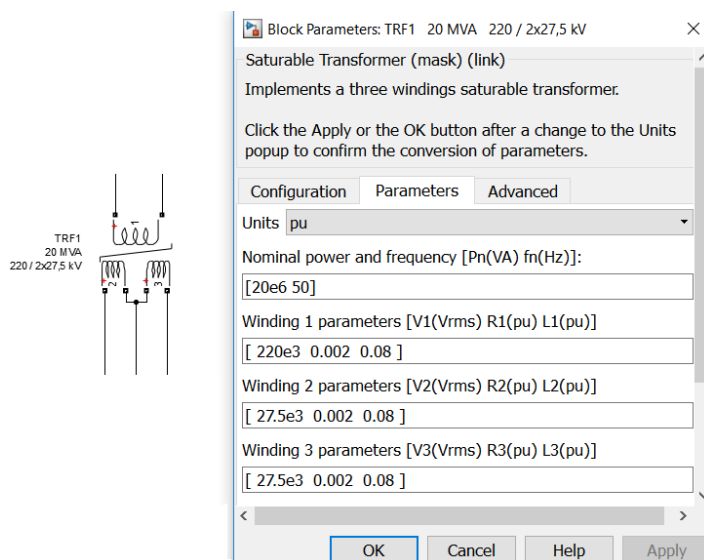


Figura 5.39 – Bloco de simulação “Saturable Transformer”.

5.3.1.4. SISTEMA DE TRAÇÃO

O sistema de tração elétrica da linha da Beira Baixa, conforme descrito anteriormente é constituído por dois setores de catenária. Com base no esquema longitudinal de catenária da Fatela (anexo VII), estes setores de catenária, conforme se observa na Figura 5.40 foram subdivididos nas diversas secções elementares existentes. Para o setor de 37,47 km a norte da SST, delimitado entre a ZN de Alcains e a SST da Fatela, foram seleccionadas para o estudo 8 secções elementares, incluindo as SE das estações de Alcains, Lardosa, Castelo Branco e Vale dos Prazeres. O setor de 27,84 km a sul da SST, delimitado entre a SST da Fatela e o fim da via eletrificada na Covilhã, apresenta 6 secções elementares, incluindo a SE das estações do Fundão, Tortosendo e Covilhã.

A modelação do sistema de tração em ambiente Matlab/Simulink foi realizado conforme se observa pela Figura 5.41. Pode-se verificar que cada secção elementar do sistema de tração é constituída por três blocos de simulação “Series RLC Branch, ou seja, um bloco para o sistema de catenária, outro bloco para o carril e outro bloco para o feeder. Não se tendo conseguido obter os dados oficiais pela IP relativos às características do sistema de tração, utilizaram-se os valores referenciados em [27], sendo os seguintes:

Impedância do Feeder: $Z_F = 0,2036 + j0,8847 \Omega/km$

Impedância da Catenária: $Z_C = 0,1192 + j0,7522 \Omega/km$

Impedância do Carril: $Z_R = 0,1648 + j0,6709 \Omega/km$

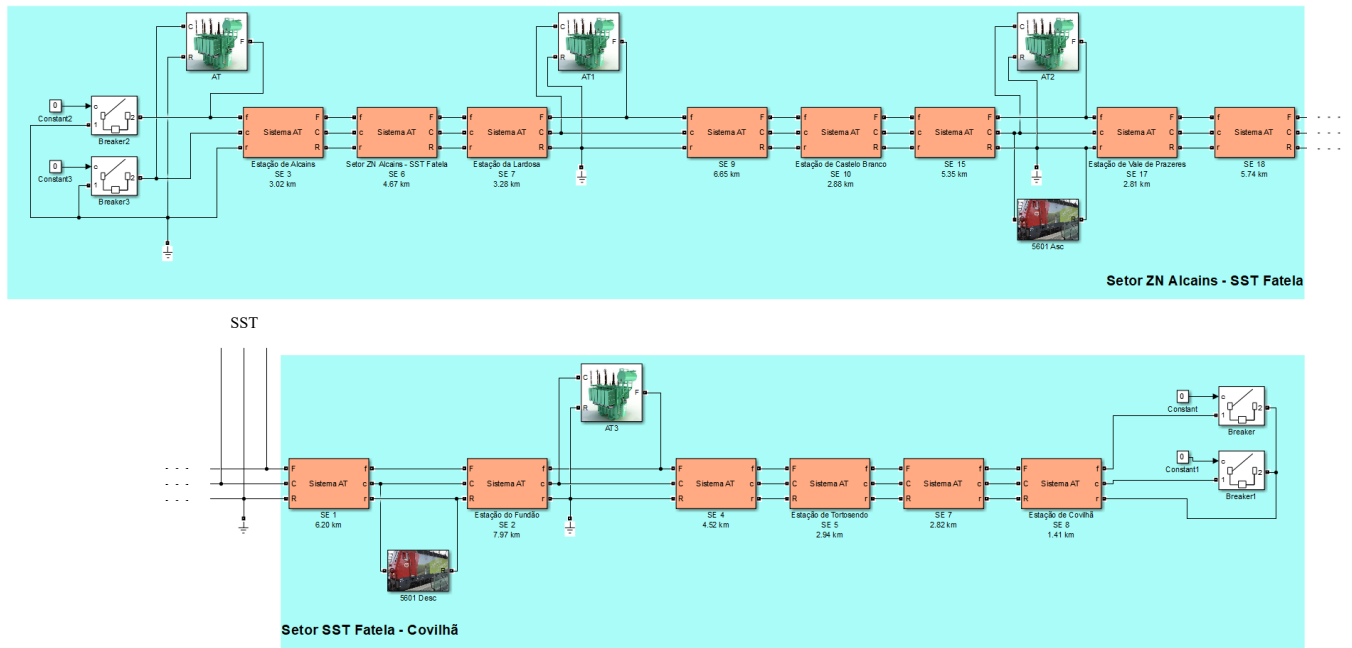
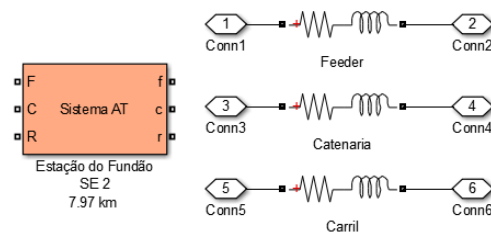


Figura 5.40 – Modelação do sistema de transmissão de tração.



Block Parameters: Feeder	Block Parameters: Catenaria	Block Parameters: Carril
Series RLC Branch (mask) (link)	Series RLC Branch (mask) (link)	Series RLC Branch (mask) (link)
Implements a series branch of RLC elements. Use the 'Branch type' parameter to add or remove elements from the branch.	Implements a series branch of RLC elements. Use the 'Branch type' parameter to add or remove elements from the branch.	Implements a series branch of RLC elements. Use the 'Branch type' parameter to add or remove elements from the branch.
Parameters	Parameters	Parameters
Branch type: RL	Branch type: RL	Branch type: RL
Resistance (Ohms): 0.2036*7.97	Resistance (Ohms): 0.1192*7.97	Resistance (Ohms): 0.1648*7.97
Inductance (H): 0.8847/(2*pi*50)*7.97	Inductance (H): 0.7522/(2*pi*50)*7.97	Inductance (H): 0.6709/(2*pi*50)*7.97
<input type="checkbox"/> Set the initial inductor current	<input type="checkbox"/> Set the initial inductor current	<input type="checkbox"/> Set the initial inductor current
Measurements Branch current	Measurements Branch current	Measurements Branch current
OK Cancel Help Apply	OK Cancel Help Apply	OK Cancel Help Apply

Figura 5.41 – Bloco de simulação “Series RLC Branch”.

5.3.1.5. AUTOTRANSFORMADORES

Conforme referenciado anteriormente, os postos autotransformadores de tração, são instalados no sistema 2x25 kV e distam entre si teoricamente entre 10 a 12 km, permitindo desta forma, garantir circulação de corrente no sistema de retorno à passagem de um comboio apenas na zona delimitada por dois autotransformadores de tração, deste modo, a corrente de tração é distribuída pela catenária e feeder de forma a diminuir as quedas de tensão ao longo da linha. Com base no esquema longitudinal de catenária da Fatela (anexo VII), verifica-se que na linha da Beira Baixa que existem 4 postos autotransformadores. A sul da SST da Fatela estão instalados em Alcains, Soalheira, Alpedrinha estando distanciados entre si de 13,90 km e 10,07 km. A norte da SST da Fatela o posto autotransformador encontra-se instalado em Alcaria e dista 14,16 km entre a SST da Fatela e o posto de catenária. Pela observação das características dos autotransformadores da linha da Beira Baixa foram definidos, conforme se observa pelos dados do bloco de simulação da Figura 5.42, os parâmetros da potência nominal, frequência da rede e valor de tensão composta nos enrolamentos do primário e secundário do transformador, sendo estes os seguintes:

$$S_n = 5 \text{ MVA}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$V_{n1} = 55 \text{ kV}$$

$$V_{n2} = 27,5 \text{ kV}$$

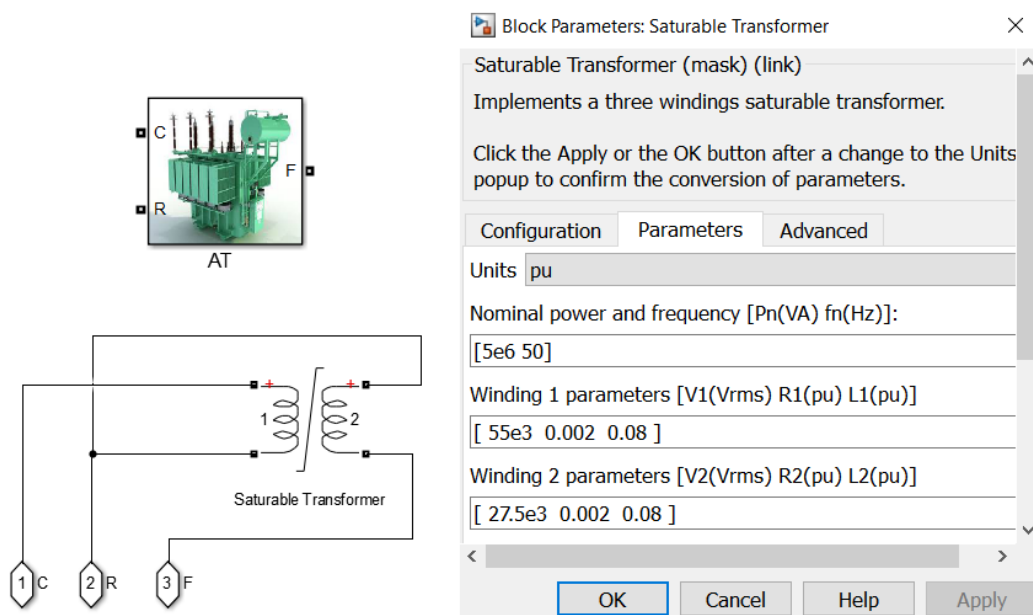


Figura 5.42 – Bloco de simulação “Saturable Transformer”.

5.3.1.6. CARGAS DE TRAÇÃO

As cargas de tração inseridas nas secções elementares tiveram como base os horários e gráficos de circulação da respetiva linha de circulação ferroviária. Através da introdução de interruptores entre cada secção elementar e pela comutação desses interruptores foi simulado o movimento dos comboios. Conforme se observa pelos dados da Figura 5.43, foi utilizado um bloco de simulação do tipo “*Series RLC Load*” de potência constante. Na linha da Beira Baixa apenas existe a locomotiva elétrica da série 5600 (vulgarmente chamada de intercidades) a circular [28]. Considerando uma carga móvel de potência e velocidade constante, com um fator de potência de 0,8, conforme se verifica na Figura 5.43 foram definidos no bloco de simulação os seguintes parâmetros:

Comboio Intercidades

Locomotiva Elétrica da Série 5600

$$V_n = 25 \text{ kV}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$P = 5600 \text{ kW}$$

$$S = 7000 \text{ kVA}$$

$$Q = 4200 \text{ kvar}$$

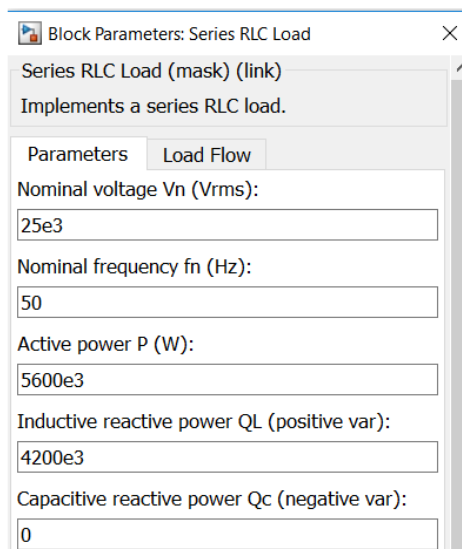
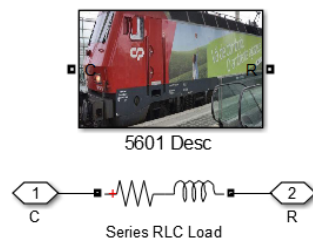


Figura 5.43 – Bloco de simulação “*Series RLC Load*”.

5.3.1.7. CARGAS

Igualmente, tendo como base a caracterização da RNT [24], foram inseridas na rede, cargas às saídas das subestações do Pocinho, Chafariz e Ferro. Para o efeito, utilizou-se o bloco de simulação “*Three-Phase Series RLC Load*”, que conforme se verifica na Figura 5.44, foram definidos os parâmetros de tensão composta, frequência da rede, valor de potência ativa e reativa, sendo estes os seguintes:

Carga do Pocinho

$$V_n = 220 \text{ kV}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$P = 24,7 \text{ MW}$$

$$Q = 2,7 \text{ Mvar}$$

Carga de Chafariz

$$V_n = 220 \text{ kV}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$P = 20,7 \text{ MW}$$

$$Q = 6,1 \text{ Mvar}$$

Carga de Ferro

$$V_n = 220 \text{ kV}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$P = 40,2 \text{ MW}$$

$$Q = 21,4 \text{ Mvar}$$

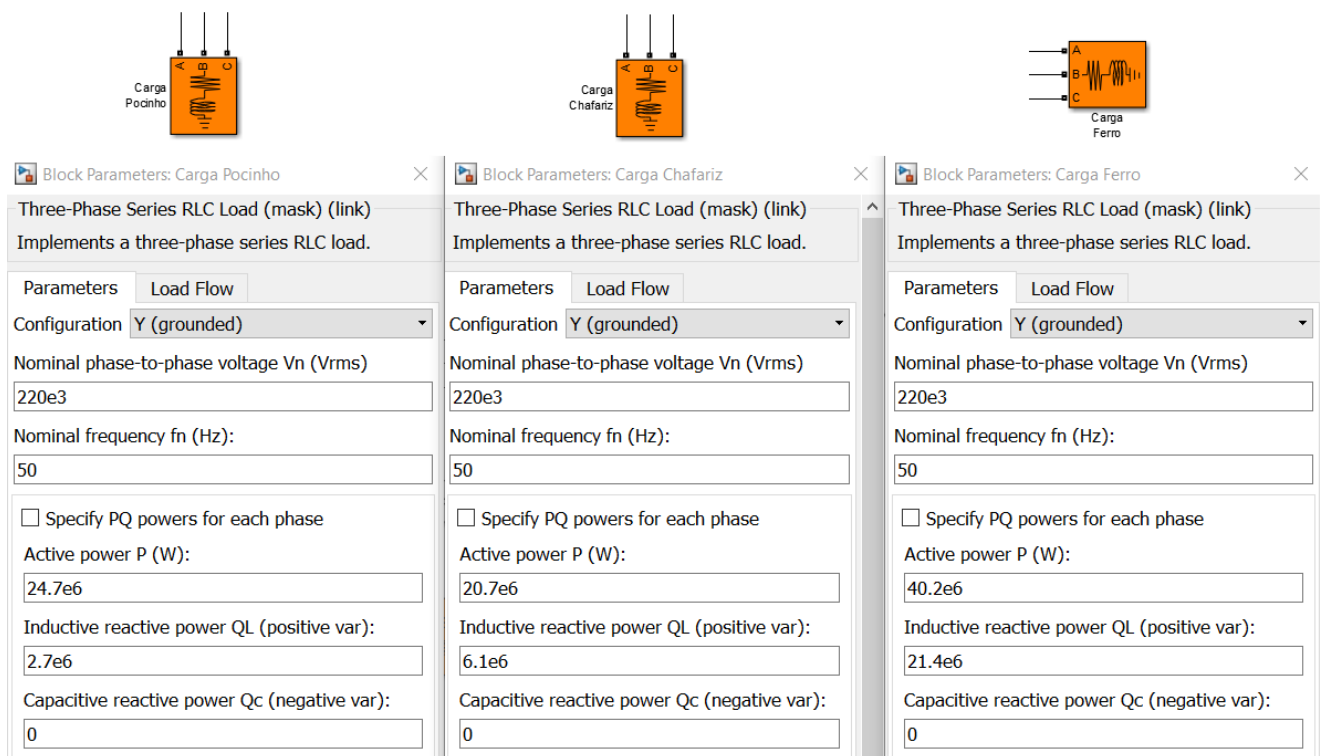


Figura 5.44 – Bloco de simulação “*Three-Phase Series RLC Load*”.

5.3.2. SIMULAÇÃO DO SISTEMA 2x25 kV

Com o objetivo de analisar o comportamento dos sistemas de alimentação de catenária e eventuais desequilíbrios causados na rede trifásica de transmissão procedeu-se a várias simulações do sistema 2x25 kV, de acordo com a representação da Figura 5.32. Com base nas premissas descritas anteriormente, consideraram-se os diversos cenários de simulação:

- **Cenário 1** – Sistema ferroviário em vazio;
- **Cenário 2** – Carga móvel de potência constante;
- **Cenário 3** – Duas cargas móveis de potência constante;
- **Cenário 4** – Perturbação na rede de tração.

5.3.2.1. CENÁRIO 1

O objetivo deste cenário é verificar a correta modelação do sistema pretendido e confirmar os valores descritos no capítulo 3.2. Os valores da tensão na geração são os esperados, nomeadamente 220 kV de valor eficaz da tensão composta e respetivo valor de pico de 312 kV, conforme se verifica na Figura 5.45. Pela observação da Figura 5.46, constata-se também os valores esperados de 220 kV (V_{RMS}) para o primário do transformador de tensão da SST de Fatela e para o secundário de 27,5 kV (V_{RMS}) para as tensões na catenária-carril e no feeder-carril e de 55 kV (V_{RMS}) para a tensão na catenária-feeder.

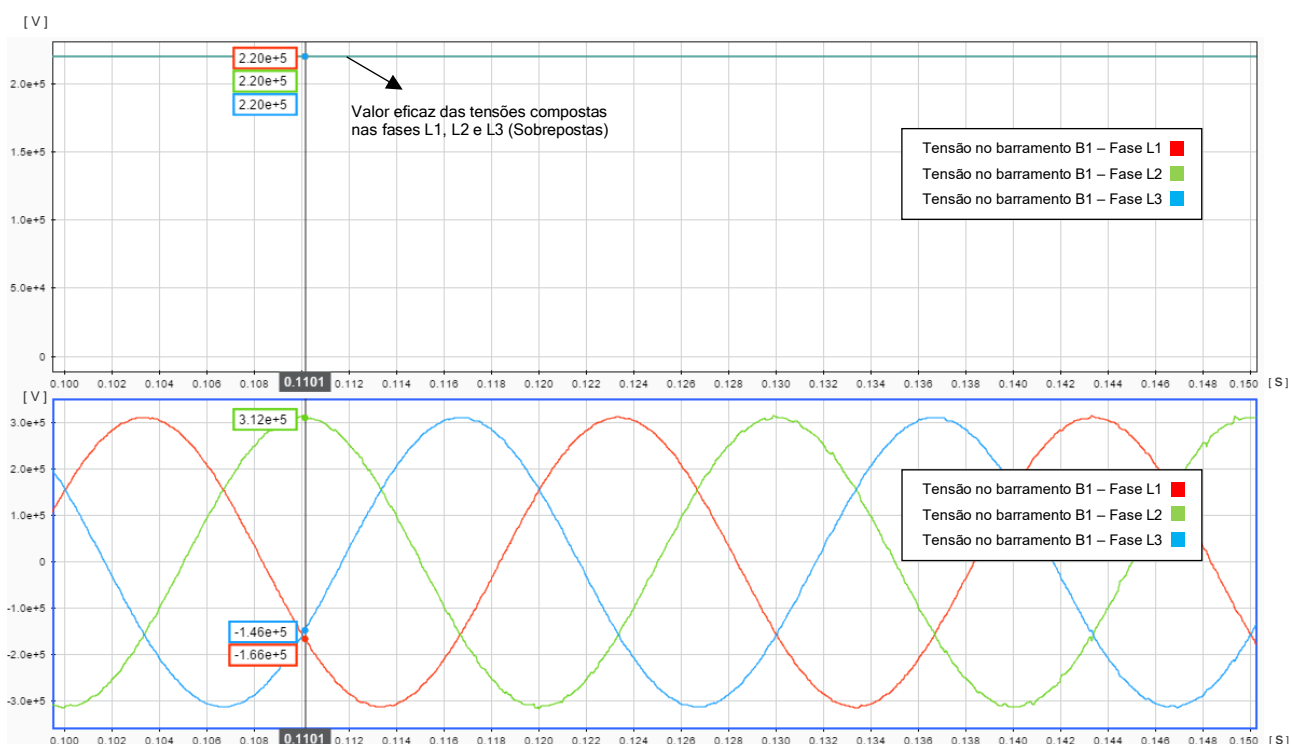


Figura 5.45 – Tensões na geração (Barramento do Pocinho – B1) – Cenário 1.
Topo: Evolução do valor eficaz das tensões compostas; Fundo: Evolução instantânea das tensões compostas.

Observando a Figura 5.47, verifica-se que o coeficiente de desequilíbrio presente no barramento de Ferro (B3) é praticamente nulo (0,05 %) quando o sistema ferroviário se encontra em vazio, sendo este apenas devido às cargas aplicadas à saída das subestações do Pocinho, Chafariz e Ferro.

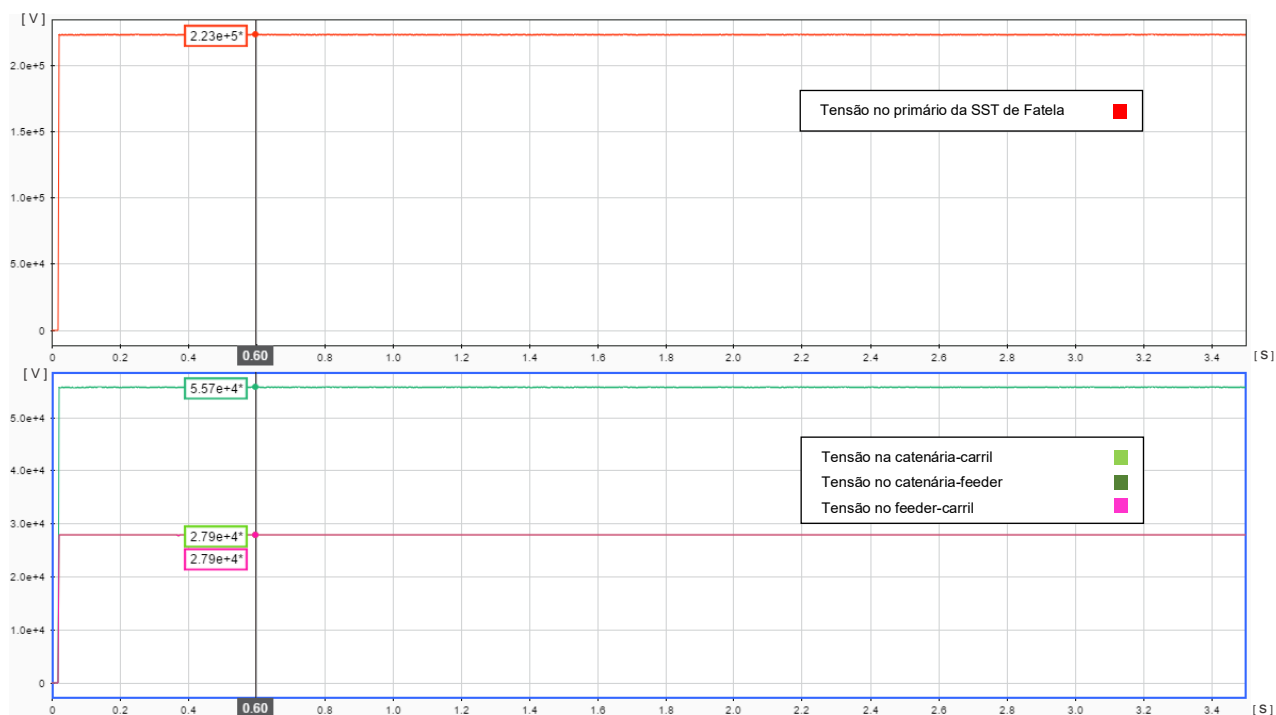


Figura 5.46 – Tensões no primário e secundário da SST – Cenário 1.

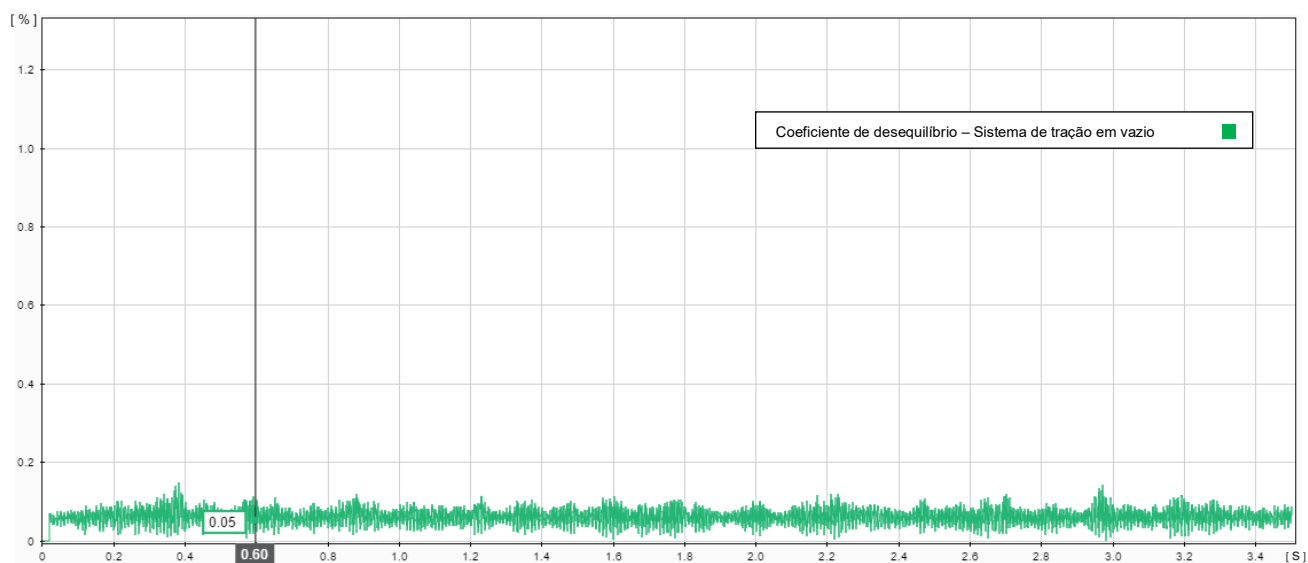


Figura 5.47 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Ferro – B3) – Cenário 1.

5.3.2.2. CENÁRIO 2

O objetivo deste cenário é verificar o comportamento da rede tração elétrica e eventuais desequilíbrios na rede trifásica de transmissão. Neste cenário, conforme se observa pela Figura 5.48, foi simulada uma locomotiva da série 5601 em movimento com potência constante a deslocar-se no sentido descendente desde a estação de Covilhã até a zona neutra de Alcains, passando sensivelmente a meio percurso pela SST da Fatela. A locomotiva percorrerá 27,84 km entre a estação da Covilhã e a SST de Fatela e 37,47 km entre a SST e a ZN de Alcains. A locomotiva, deslocando-se com uma velocidade constante de 80 km/h (zona de potência nominal da carga) levará cerca de 48 minutos e 59 segundos para efetuar esse percurso, correspondendo cada trajeto a um tempo de simulação de 2,20 segundos. A simulação inicia-se aos 0 segundos, a carga inicia a sua marcha na estação da Covilhã (secção elementar 8) aos 0,05 segundos, sai da zona neutra de Alcains (secção elementar 3) aos 2,25 segundos terminando a simulação aos 2,4 segundos.

Observando a Figura 5.49, verifica-se que os valores da tensão na geração são os esperados, nomeadamente 220 kV de valor eficaz da tensão composta e respetivo valor de pico de 312 kV. Pela análise da Figura 5.50 e Figura 5.51, conforme esperado, verifica-se que a corrente na fase A é nula pelo facto da SST ter alimentação bifásica pelas fases B e C. Em sistemas trifásicos equilibrados, o desfasamento entre correntes é de 120°, contudo neste sistema, face à alimentação bifásica, o transformador da SST cria um efeito de oposição nestas mesmas fases originando um desfasamento de 180° entre correntes.

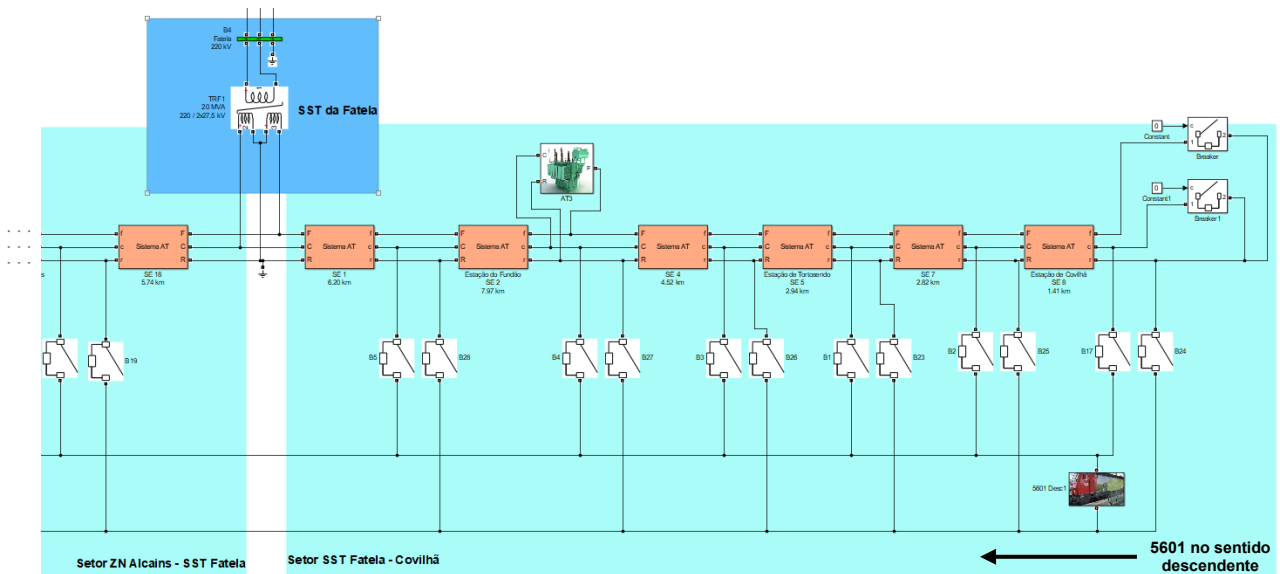


Figura 5.48 – Simulação do sistema de 2x25 kV com uma carga móvel – Cenário 2.

Pode-se observar na Figura 5.50 a existência de variações em patamares das correntes sendo que estas ocorrem devido à comutação dos interruptores que simulam o movimento do comboio. Na realidade as correntes não são observáveis desta forma, existindo uma variação gradual à medida que os comboios se afastam/aproximam das SST.

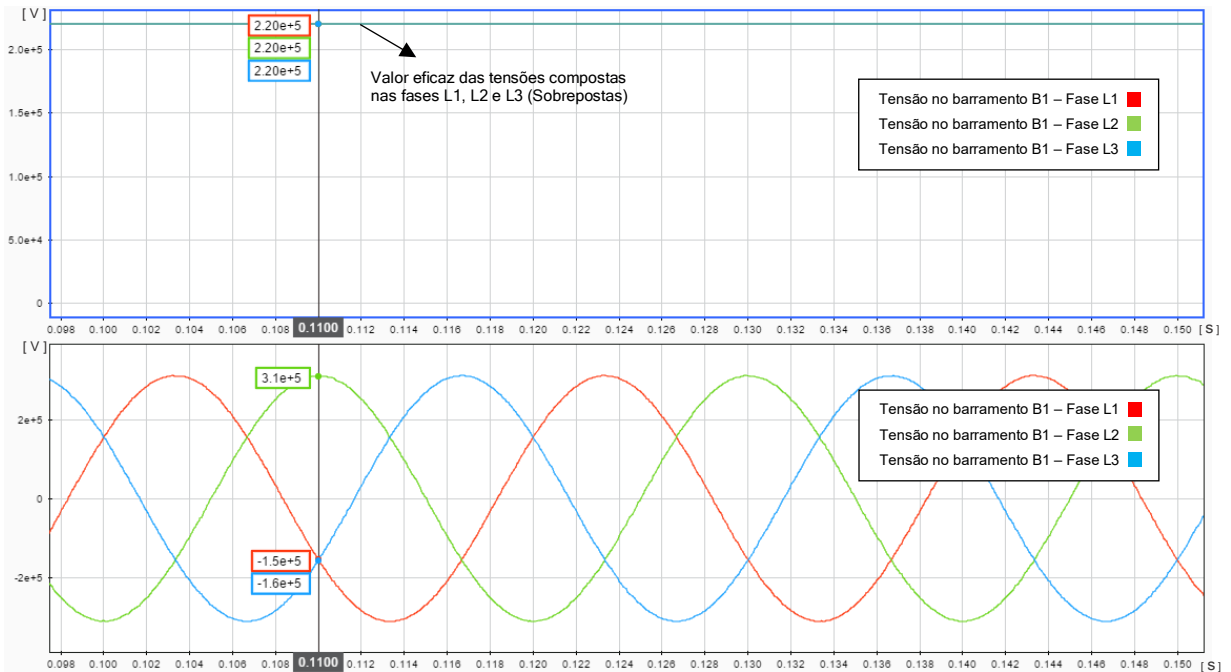


Figura 5.49 – Tensões na geração (Barramento do Pocinho - B1) – Cenário 2.

Topo: Evolução do valor eficaz das tensões compostas; Fundo: Evolução instantânea das tensões compostas.

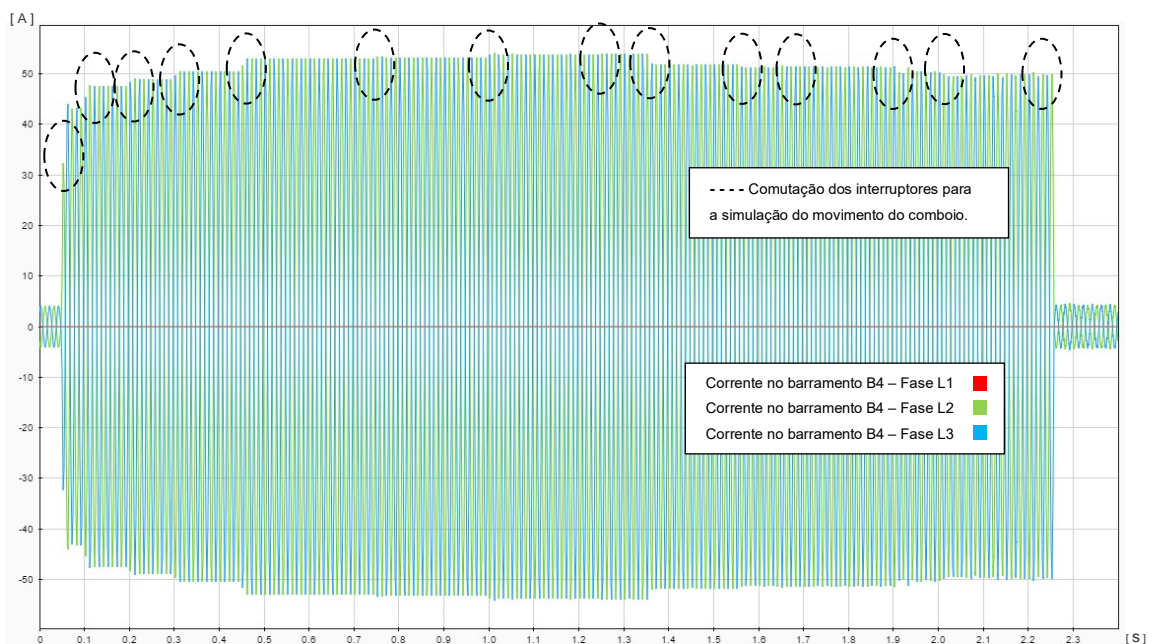


Figura 5.50 – Correntes no barramento de Fatela (B4) – Cenário 2.

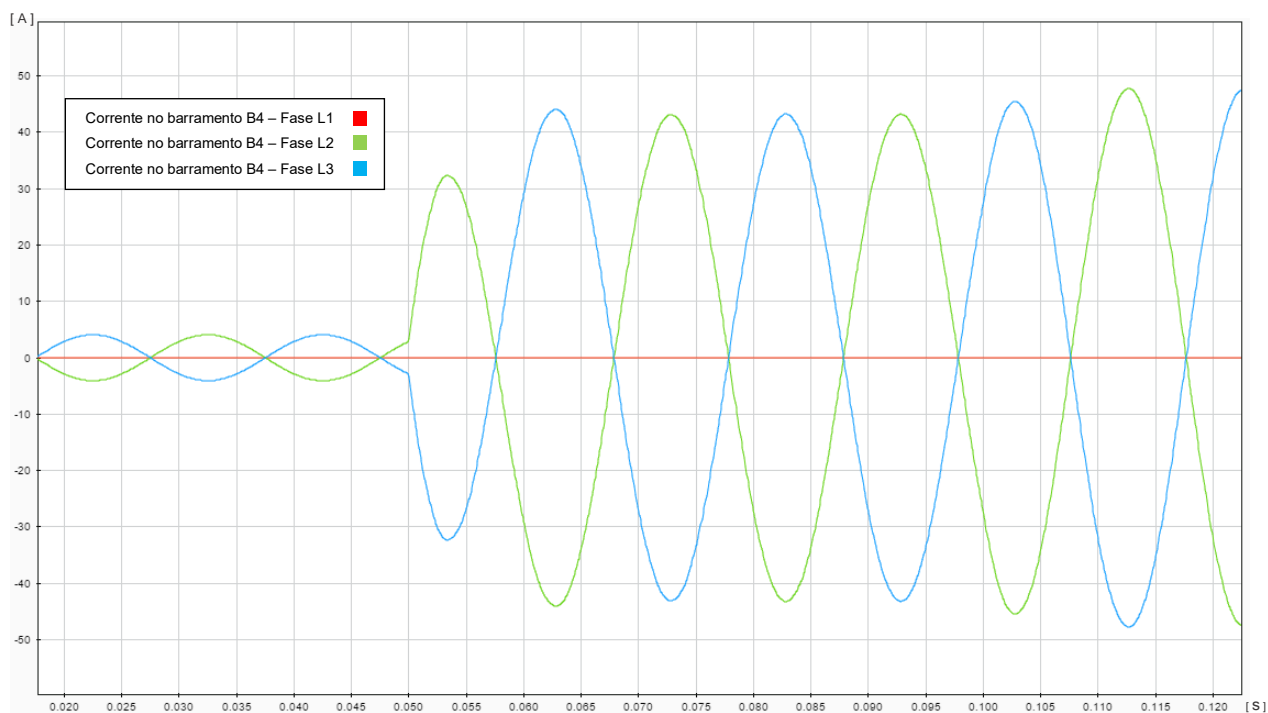
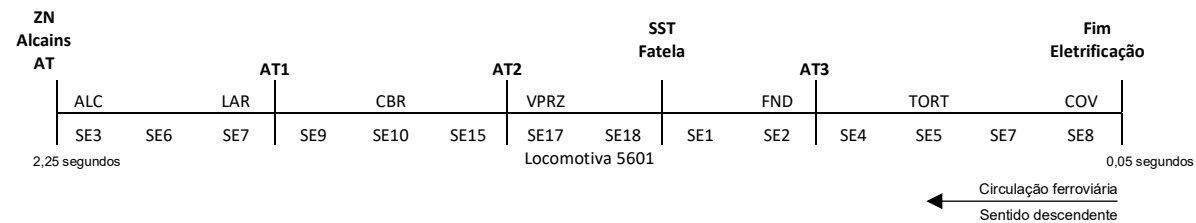


Figura 5.51 – Correntes no barramento de Fatela (B4) – Pormenor – Cenário 2.

Na Figura 5.52 e na Figura 5.53 apresenta-se a evolução das tensões e correntes presentes no primário e secundário da SST (Catenária-Carril, Feeder-Carril e Catenária-Feeder) de Fatela assim como a tensão e corrente presente no pantógrafo da locomotiva. Com base nesses gráficos, resultantes da simulação do sistema 2x25 kV com uma carga em movimento com potência constante a deslocar-se no sentido descendente desde a estação de Covilhã até a zona neutra de Alcains, passando sensivelmente a meio percurso pela SST da Fatela, elaborou-se a Tabela 8 com a anotação das tensões e correntes ao longo trajeto da locomotiva.

É possível verificar que a tensão no primário da SST sofre apenas uma variação de -1% e +0,1% em relação à tensão de referência em vazio (220 kV) oscilando entre os 218,6 kV junto da SST e 220,3 kV no ponto mais distante do setor, junto da ZN de Alcains, que se encontra a 37,47 km da SST. Relativamente à tensão no secundário da SST, medida na catenária, face à potência da carga aplicada sofre um decréscimo entre 3% a 5% em relação à tensão de referência em vazio (27,5 kV) oscilando entre os 26,26 kV e 26,59 kV, junto da SST e no ponto mais distante do setor respetivamente. As variações de tensão relativamente ao RCT e ao feeder situam-se na ordem dos 4% oscilando entre 26,44 kV e 26,62 kV para o RCT e 52,81 kV e 53,21 kV para o feeder. No que diz respeito à tensão no pantógrafo da locomotiva sofre uma variação entre -12% e +1,4% em relação à tensão nominal (25 kV) oscilando entre os 22,10 kV e 25,34 kV.

Tabela 8 – Tensões e Correntes no primário e secundário da SST e no pantógrafo da locomotiva – Cenário 2 – 2x25 kV.



Tensões [kV]	Referência	SE3	SE6	SE7	SE9	SE10	SE15	SE17	SE18	SE1	SE2	SE4	SE5	SE7	SE8
SST Primário	220,00	220,3	219,7	219,6	218,8	218,8	218,6	218,6	218,6	218,6	218,6	218,7	218,8	218,9	219,2
SST Secundário Catenária-Carril	27,50	26,59	26,53	26,51	26,42	26,41	26,38	26,36	26,30	26,26	26,38	26,40	26,42	26,43	26,52
SST Secundário Feeder-Carril	27,50	26,62	26,55	26,53	26,45	26,46	26,45	26,45	26,51	26,55	26,44	26,46	26,48	26,50	26,52
SST Secundário Catenária-Feeder	55,00	53,21	53,08	53,04	52,88	52,88	52,84	52,81	52,82	52,82	52,82	52,86	52,89	52,94	53,09
Carga 1	25,00	23,34	23,16	23,49	24,07	23,99	24,26	25,34	25,28	24,94	24,85	23,58	22,80	22,10	19,88

Correntes [A]	Referência	SE3	SE6	SE7	SE9	SE10	SE15	SE17	SE18	SE1	SE2	SE4	SE5	SE7	SE8
SST Primário	90,9	35,0	35,1	35,4	36,3	36,2	36,6	38,1	38,1	37,6	37,5	35,7	34,6	33,6	30,5
SST Secundário Catenária	363,6	143,0	143,2	145,2	149,1	154,5	158,8	170,3	202,0	219,9	162,8	155,0	150,3	146,0	132,1
SST Secundário RCT	363,6	8,2	8,3	9,6	10,4	21,7	27,0	37,9	101,6	141,0	28,1	26,7	25,9	25,1	22,5
SST Secundário Feeder	363,6	135,3	135,5	136,1	139,2	133,1	132,1	132,7	100,6	79,0	135,0	128,6	124,7	121,1	109,8
Carga 1	320,0	259,6	260,0	262,5	269,5	268,6	271,7	283,8	283,2	279,2	278,3	264,0	255,4	247,5	222,2

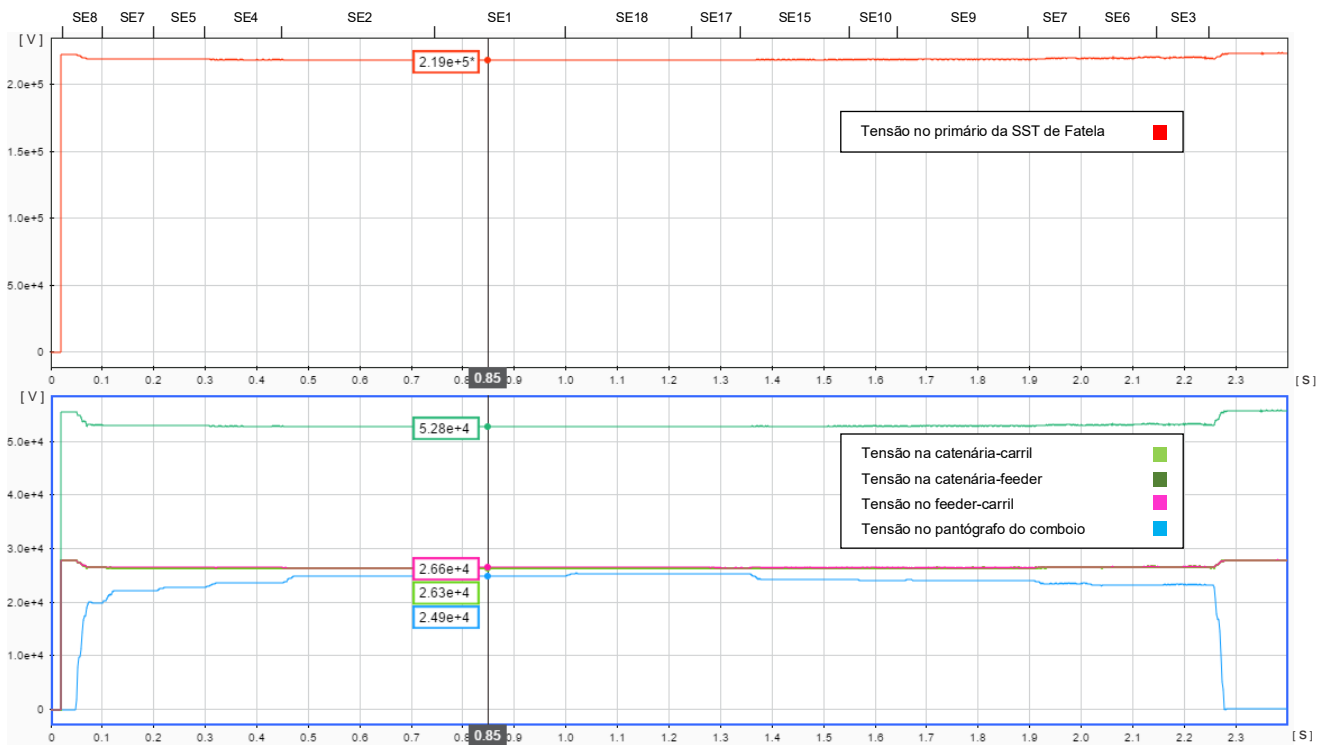


Figura 5.52 – Tensões no primário e secundário da SST e no pantógrafo da locomotiva – Cenário 2.

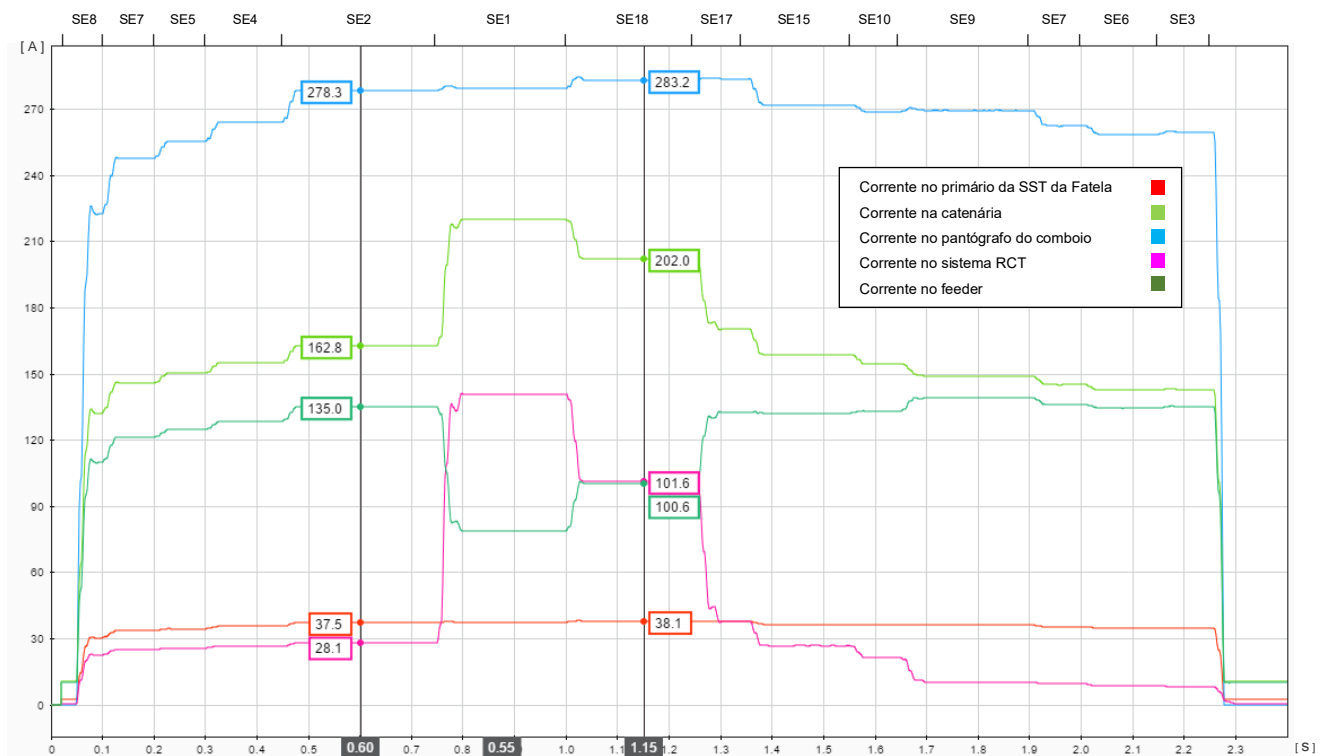


Figura 5.53 – Correntes no primário da SST, secundário da SST (catenária, feeder, carril) e carga – Cenário 2.

É possível observar que as correntes no primário da SST oscilam entre os 33,6 A e 38,1 A, verificando-se que a SST da Fatela se encontra entre 37,0% e 41,9% da sua capacidade máxima (90,9 A) quando circula um comboio nos setores alimentados por esta SST num regime de carga constante e permanente. É possível verificar e comprovar que no sistema 2x25 kV a corrente que retorna pelo sistema de RCT à SST é bastante reduzida sempre que a carga se situa entre autotransformadores. A análise desta situação é realizada de forma mais detalhada na secção 5.3.3. Observando a Figura 5.54, verifica-se um ligeiro desequilíbrio provocado pela carga monofásica de tração (comboio) à rede trifásica de alimentação, tendo o coeficiente de desequilíbrio um valor máximo de 1,20% no barramento de Ferro.

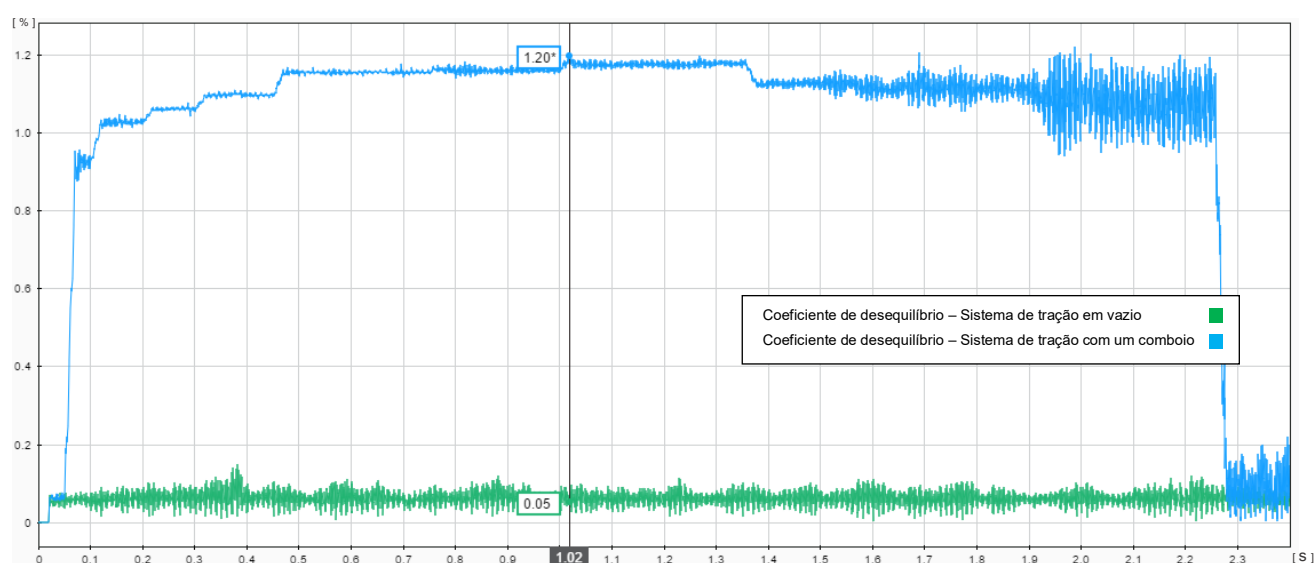


Figura 5.54 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Ferro – B3) – Cenário 2.

5.3.2.3. CENÁRIO 3

O objetivo deste cenário é semelhante ao exposto para o cenário 2, mas empregando na simulação, duas cargas móveis de potência constante. Será verificado o comportamento da rede tração elétrica e eventuais desequilíbrios na rede trifásica de transmissão. Neste cenário foram simuladas duas locomotivas da série 5601, uma primeira a deslocar-se no sentido descendente desde a estação de Covilhã até a zona neutra de Alcains, e uma segunda a deslocar-se em sentido oposto, ou seja, a deslocar-se no sentido ascendente desde a zona neutra de Alcains até à estação de Covilhã, ambas com potência constante e passando sensivelmente a meio percurso pela SST da Fatela. Cada comboio percorrerá 65,31 km entre os limites definidos, deslocando-se com uma velocidade constante de 80 km/h (zona de potência nominal da carga) levando cerca de 48 minutos e 59 segundos para efetuar esse percurso. Na simulação do MATLAB/SIMULINK, cada trajeto equivalerá a um tempo de 2,20 segundos.

A simulação inicia-se aos 0 segundos, a primeira locomotiva inicia a sua marcha na estação da Covilhã (secção elementar 8) aos 0,05 segundos e sai da zona neutra de Alcains (secção elementar 3) aos 2,25 segundo. A segunda locomotiva inicia a sua marcha na ZN de Alcains aos 0,95 segundos e termina a sua marcha na estação da Covilhã aos 3,1 segundos. Os comboios irão cruzar aos 1,65 segundos na estação de Castelo Branco (secção elementar 10). A simulação termina aos 3,5 segundos. Neste cenário existem três situações distintas; inicialmente só um dos comboios 5601 se encontra a circular, depois dá-se a entrada do segundo comboio 5601, ficando dois comboios em marcha e finalmente o primeiro comboio 5601 sai do setor considerado na simulação ficando apenas a circular o segundo comboio 5601. Observando a Figura 5.55, verifica-se que as tensões na geração, à semelhança dos cenários 1 e 2, são os esperados, nomeadamente 220 kV de valor eficaz da tensão composta e respetivo valor de pico de 312 kV.

Na Figura 5.56 e na Figura 5.57 apresenta-se a evolução das tensões e correntes presentes no primário e secundário da SST da Fatela assim como as tensões e correntes presentes nos pantógrafos das locomotivas. Com base nesses gráficos, resultantes da simulação do sistema 2x25 kV com duas cargas em movimento com potência constante, uma primeira a deslocar-se no sentido descendente desde a estação de Covilhã até a zona neutra de Alcains e uma segunda a deslocar-se em sentido oposto, passando ambas pela SST da Fatela, elaborou-se a Tabela 9 com a anotação das tensões e correntes ao longo trajeto das locomotivas.

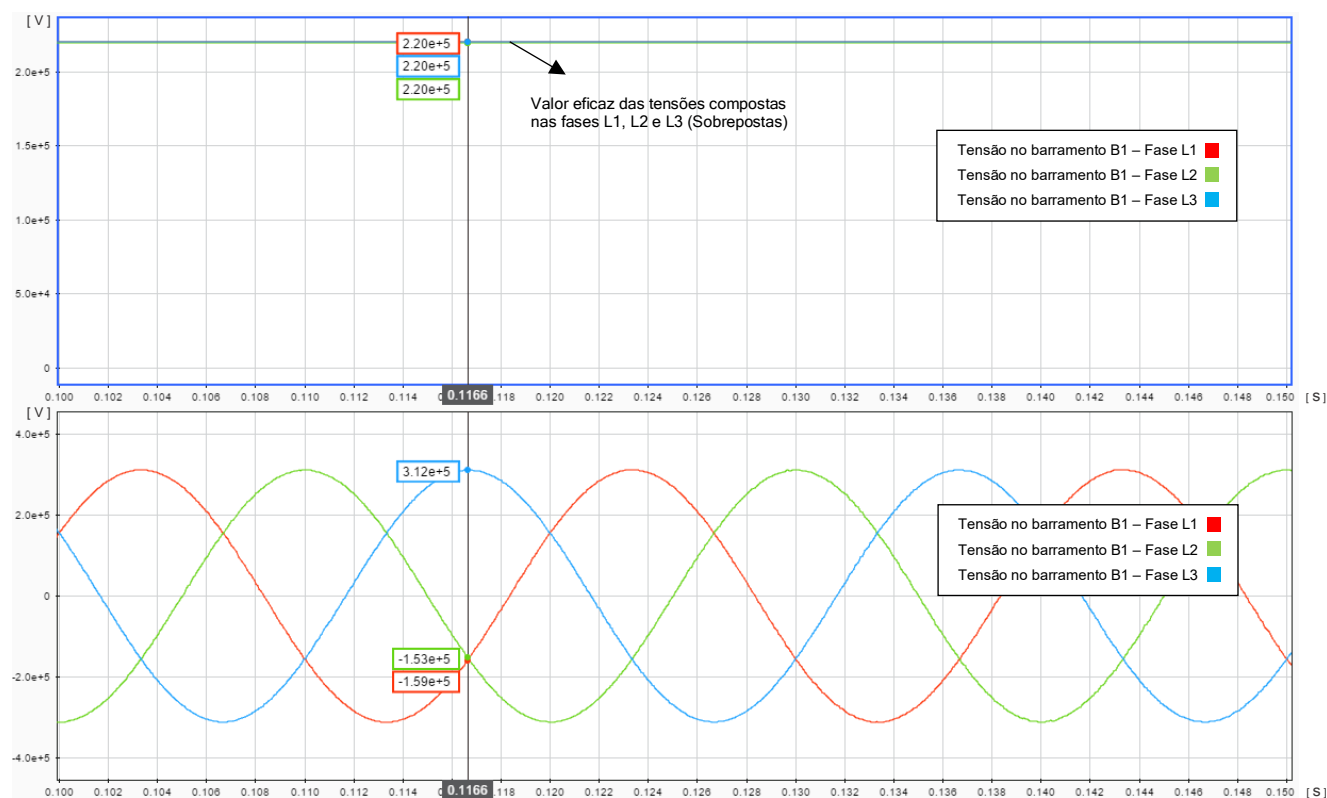


Figura 5.55 – Tensões na geração (Barramento do Pocinho - B1) – Cenário 3.

Topo: Evolução do valor eficaz das tensões compostas; Fundo: Evolução instantânea das tensões compostas.

Tabela 9 – Tensões e Correntes no primário e secundário da SST e nos pantógrafos das locomotivas – Cenário 3 – 2x25 kV.

		0,05 segundos						0,95 segundos						2,25 segundos						3,1 segundos							
		1 comboio						2 comboios						1 comboio													
		Locomotiva 5601						Locomotivas 5601						Locomotiva 5601													
Tensões [kV]	Referência																										
SST Primário	220,00	219,3	218,9	218,8	218,7	218,6	218,6	215,1	214,9	215,6	215,6	215,9	217,8	215,5	215,7	215,5	215,2	216,1	220,5	219,3	219,2	221,0	219,9				
SST Secundário Catenária-Carril	27,50	26,52	26,43	26,42	26,40	26,38	26,26	25,02	25,06	25,13	25,18	25,25	25,47	25,20	25,19	25,18	25,09	25,18	26,46	26,45	26,45	26,65	26,55				
SST Secundário Feeder-Carril	27,50	26,59	26,50	26,48	26,46	26,44	26,55	25,32	25,28	25,35	25,28	25,33	25,56	25,28	25,30	25,28	25,31	25,40	26,76	26,52	26,51	26,72	26,61				
SST Secundário Catenária-Feeder	55,00	53,11	52,93	52,90	52,86	52,82	52,81	50,34	50,34	50,48	50,47	50,58	51,03	50,49	50,49	50,47	50,39	50,58	53,21	52,97	52,97	53,37	53,16				
Carga 1	25,00	19,93	22,10	22,80	23,58	24,85	24,93	23,78	23,64	23,69	23,53	22,07	21,09	21,84	22,41	21,72	21,55	21,73									
Carga 2	25,00							22,05	21,54	21,92	22,15	21,87	21,09	22,03	23,51	23,53	23,67	23,78	25,13	24,91	23,62	22,96	22,18				
Correntes [A]	Referência																										
SST Primário	90,9	30,6	33,7	34,6	35,7	37,5	37,6	66,5	65,7	66,2	66,3	63,8	61,0	63,8	66,4	65,7	65,6	65,8	37,6	37,5	35,7	34,6	33,7				
SST Secundário Catenária	363,6	132,8	146,0	150,4	155,1	162,9	220,0	335,7	312,8	315,2	286,0	270,4	261,7	270,5	286,6	286,5	312,6	313,1	219,9	163,0	155,1	150,3	146,2				
SST Secundário RCT	363,6	22,7	25,1	25,9	26,7	28,1	141,0	141,1	102,2	103,0	44,0	33,3	37,4	33,2	44,2	50,2	102,2	101,7	140,9	28,2	26,8	25,9	25,1				
SST Secundário Feeder	363,6	110,4	121,1	124,7	128,6	135,0	79,1	194,6	210,7	212,3	242,5	237,7	224,8	237,8	243,0	237,5	210,5	211,5	79,1	135,1	128,6	124,7	121,3				
Carga 1	320,0	223,5	247,5	255,4	264,0	278,3	279,2	266,0	265,0	264,8	262,5	246,4	234,4	244,3	249,8	243,1	241,2	242,6									
Carga 2	320,0							246,9	241,4	245,3	248,6	244,3	234,4	246,5	262,4	263,5	264,8	264,8	279,2	278,4	264,0	255,3	247,7				

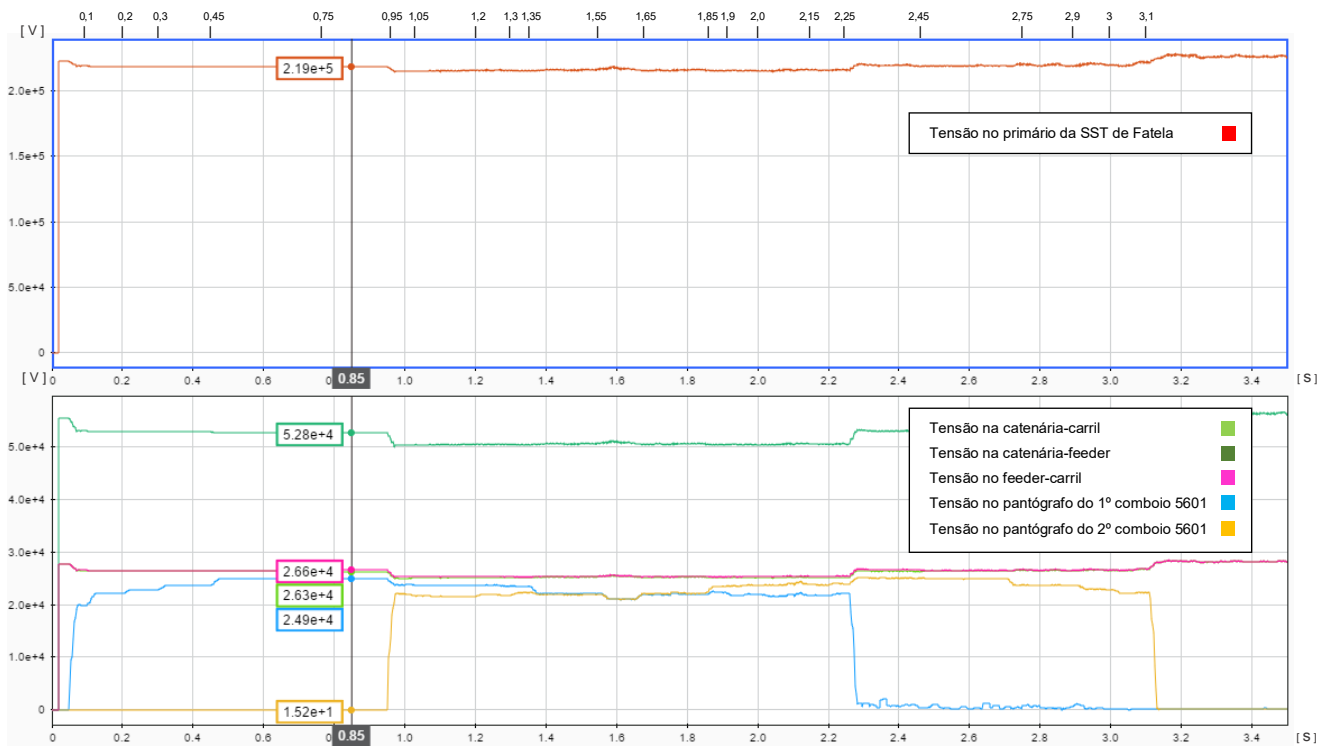


Figura 5.56 – Tensões no primário e secundário da SST e nos pantógrafos das locomotivas – Cenário 3.

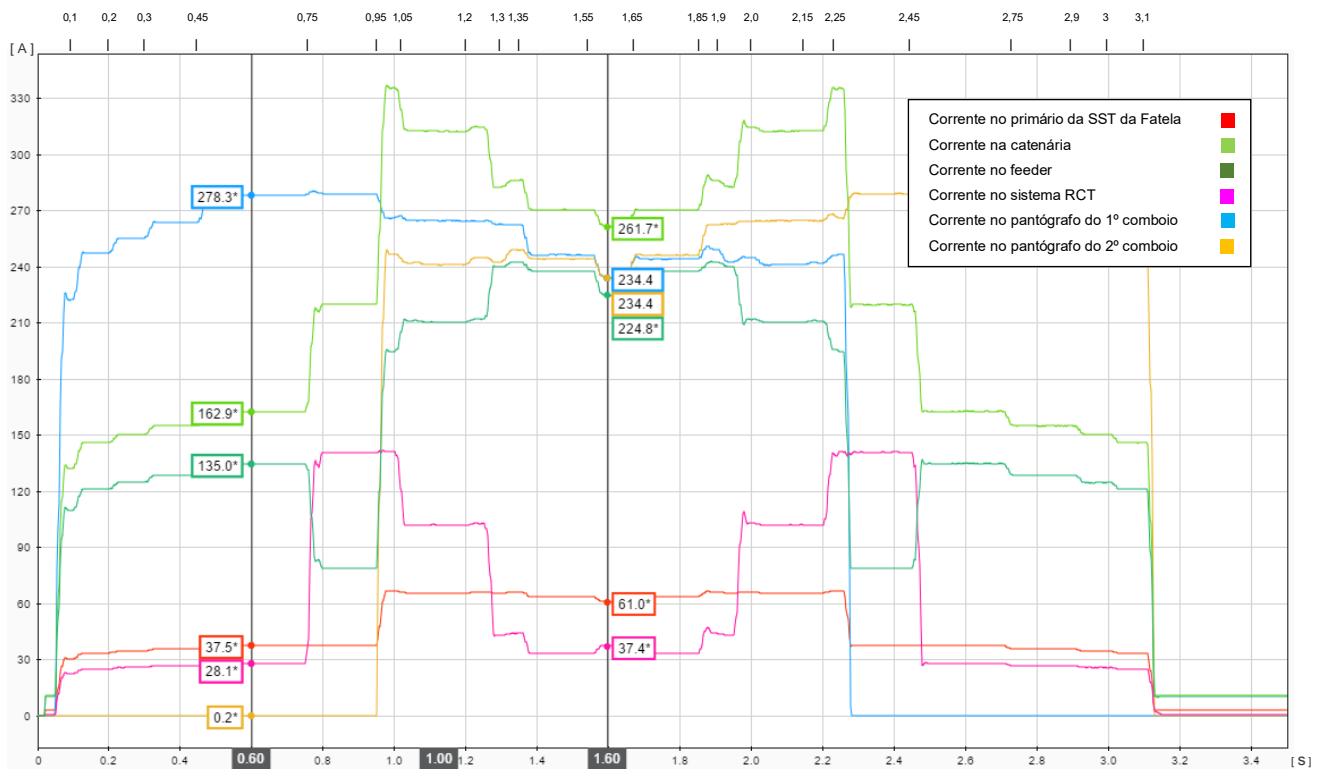


Figura 5.57 – Correntes no primário e secundário da SST (catenária, feeder e carril e cargas) – Cenário 3.

É possível verificar que a tensão no primário da SST sofre uma variação de -2,3% e +0,5% em relação à tensão de referência em vazio (220 kV) oscilando entre os 214,90 kV e 221,00 kV. Relativamente à tensão no secundário da SST, face à potência das cargas aplicadas, esta sofre um decréscimo entre 3% a 9% em relação à tensão de referência em vazio (27,5 kV) oscilando entre os 25,02 kV e 26,65 kV. As variações de tensão relativamente ao RCT e ao feeder situam-se entre os 3% e 8% oscilando entre 25,28 kV e 26,76 kV para o RCT e 50,34 kV e 53,37 kV para o feeder. No que diz respeito à tensão no pantógrafo nas locomotivas, estas sofrem uma variação entre -16% e +0,5% em relação à tensão nominal (25 kV) oscilando entre os 21,09 kV no cruzamento na estação de Castelo Branco e 25,13 kV.

Relativamente às correntes no primário da SST, estas oscilam entre os 30,6 A e 66,5 A, verificando-se que a SST da Fatela se encontra entre 33,7% e 73,2% da sua capacidade máxima (90,9 A) quando circulam duas locomotivas nos setores alimentados por esta SST num regime de carga constante e permanente. É possível verificar e comprovar que no sistema 2x25 kV a corrente que retorna pelo sistema de RCT à SST é bastante reduzida sempre que a carga se situa entre autotransformadores, tendo como valores mínimo e máximo de 8,2 A e 141,1 A respetivamente. A análise desta situação é realizada de forma mais detalhada na secção 5.3.3. Observando a Figura 5.58, verifica-se um aumento no desequilíbrio provocado pelas cargas monofásicas de tração (dois comboios 5601) à rede trifásica de alimentação, atingindo o coeficiente de desequilíbrio um valor máximo de 2,25% no barramento de Ferro.

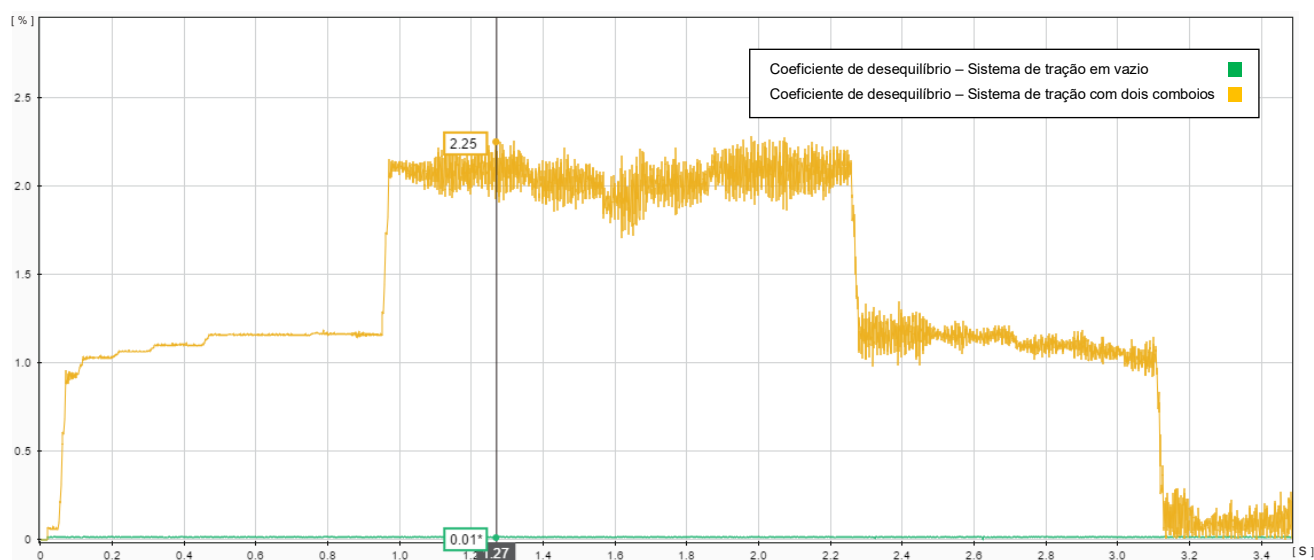


Figura 5.58 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Ferro – B3) – Cenário 3.

5.3.2.4. CENÁRIO 4

O objetivo deste cenário é verificar o comportamento da rede tração e da rede trifásica de transmissão no que diz respeito a eventuais perturbações quando surgem falhas na rede de tração. Este cenário foi simulado com base no cenário 2 mas apenas para 0,2 segundos de simulação, ou seja, quando a carga se encontra na secção elementar 7 após ter partido da estação da Covilhã. Para o efeito, foi simulada uma falha de curto-circuito falha de curto-circuito (com $R_{Falha}=0,001\Omega$) na rede de tração envolvendo uma fase (catenária - carril) junto da secção elementar 7 após a composição ter saído da estação da Covilhã. Modelou-se esta falha com início aos 0,11 segundos e duração de 30 e 180 milissegundos. Na Figura 5.59, apresenta-se a evolução das tensões e correntes presentes no primário da SST de Fatela assim como a evolução das tensões e correntes presentes no pantógrafo da locomotiva. Pode-se observar pelas formas de onda simuladas que, quando ocorre uma falha de curto-circuito entre a catenária e o carril, a rede de transmissão sofre diversas alterações, nomeadamente na tensão de alimentação:

- 30ms – Ligeira Subtensão – passa de 219 kV para 213 kV;
- 180ms – Ligeira Subtensão – passa de 219 kV para 206 kV.

A tensão da rede de tração sofre as seguintes perturbações:

- 30ms – Subtensão – passa de 20,3 kV para 15,5 kV;
- 180ms – Queda abrupta de tensão – passa de 20,3 kV para 4,37 kV.

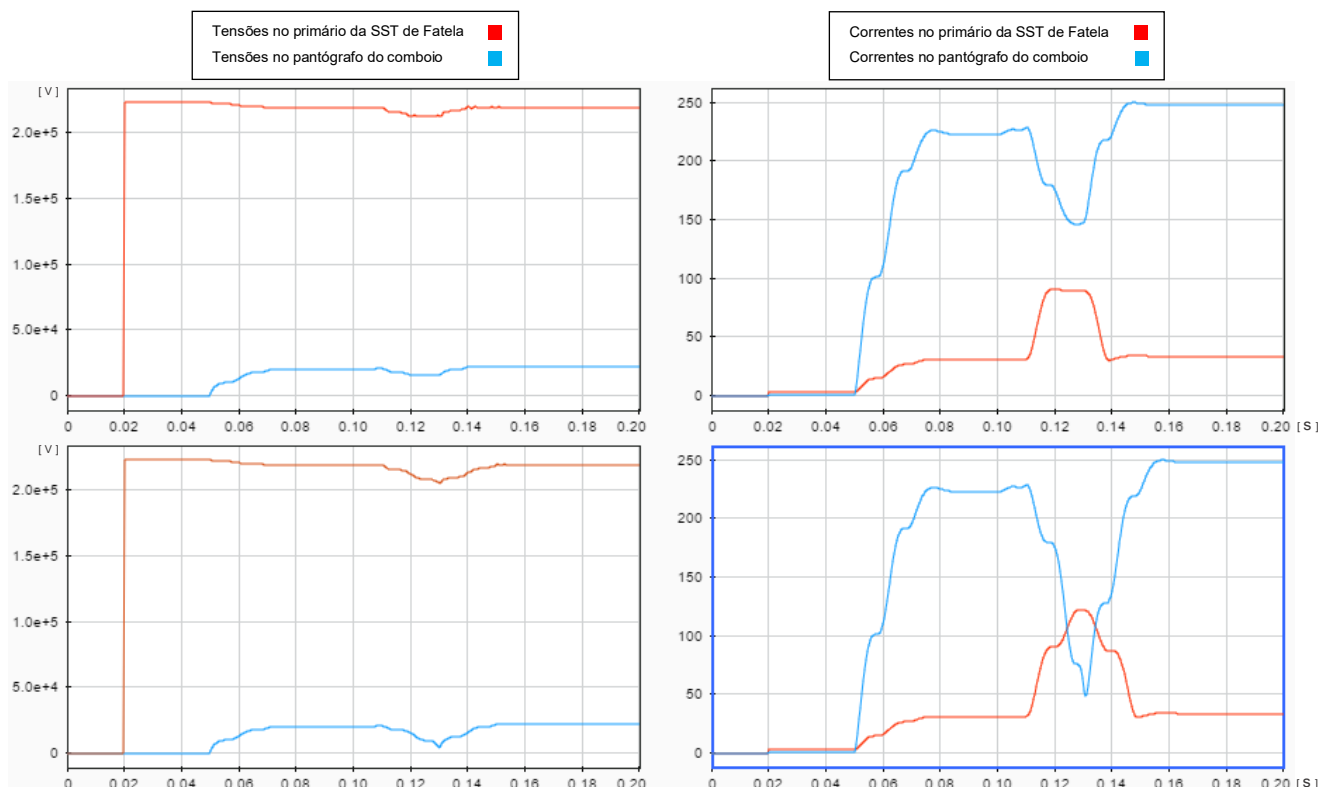


Figura 5.59 – Curto-circuito catenária-carril de 30ms e 180ms – Cenário 4.

Com base nestes valores, verifica-se que quando ocorre uma falha de curto-circuito assimétrico na rede de tração envolvendo uma fase (catenária - carril) com uma duração igual ou superior a 30 milissegundos, o sistema de tração é afetado criticamente comprometendo a circulação ferroviária. Este tipo de perturbação na rede de tração com uma duração igual ou superior a 30 milissegundos afeta ligeiramente a rede trifásica de transmissão provocando as sobrecorrentes observadas na Figura 5.59. Com base na Figura 5.60, verifica-se um aumento significativo no desequilíbrio provocado pela carga de tração à rede trifásica de alimentação, passando o coeficiente de desequilíbrio no barramento de Ferro, de um valor de 0,94% em regime nominal para um máximo de 3,94% devido a esta perturbação.

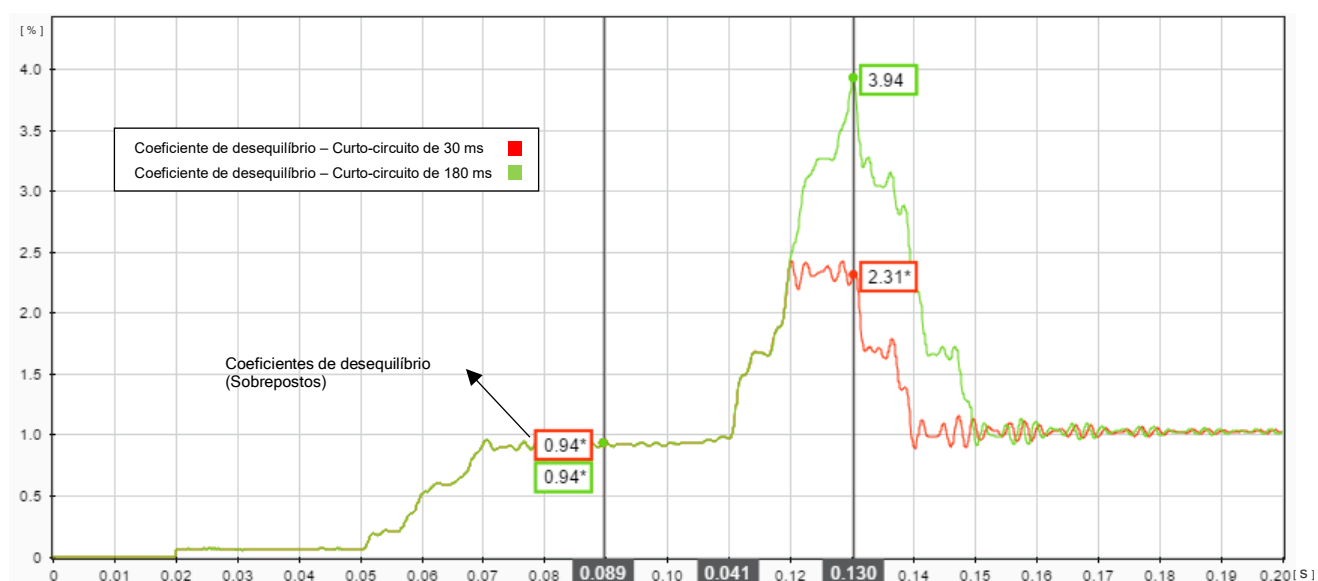


Figura 5.60 – Coeficiente de desequilíbrio (Barramento de Ferro – B3) – Cenário 4.

5.3.3. DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTES

Com o objetivo de analisar e comprovar a distribuição de correntes no sistema 2x25kV AC descrita no capítulo 3.2.2 e caracterizada na Figura 3.5, procedeu-se à simulação de três cenários. Para o efeito, considerou-se apenas o lado sul do presente sistema 2x25 kV, troço entre a zona neutra de Alcains e a SST de Fatela. O primeiro cenário (cenário 5), representado na Figura 5.61, apresenta a carga entre a SST de Fatela e o autotransformador AT2, no segundo cenário (cenário 6), representado na Figura 5.62, a carga situa-se entre os autotransformadores (AT2 e AT1) e por último, no cenário 7, representado na Figura 5.63, a carga situa-se entre os autotransformadores (AT1 e AT). Após a modelação, através da análise dos valores de corrente presentes nas representações da Figura 5.61, Figura 5.62 e Figura 5.63 (Cenários 5, 6 e 7 respetivamente) é possível confirmar e comprovar que as correntes se distribuem de acordo com o explicado no capítulo 3.2.2, ou seja, quando a carga se encontra entre dois autotransformadores de tração, a alimentação é feita através do troço da catenária a montante e a jusante, devido ao efeito dos autotransformadores.

Desta forma, a corrente elétrica de tração que circula através dos dois autotransformadores de tração retorna à SST maioritariamente através do feeder e assim a corrente que circula no sistema RCT é mínima, conforme realçado na Figura 5.62 e Figura 5.63.

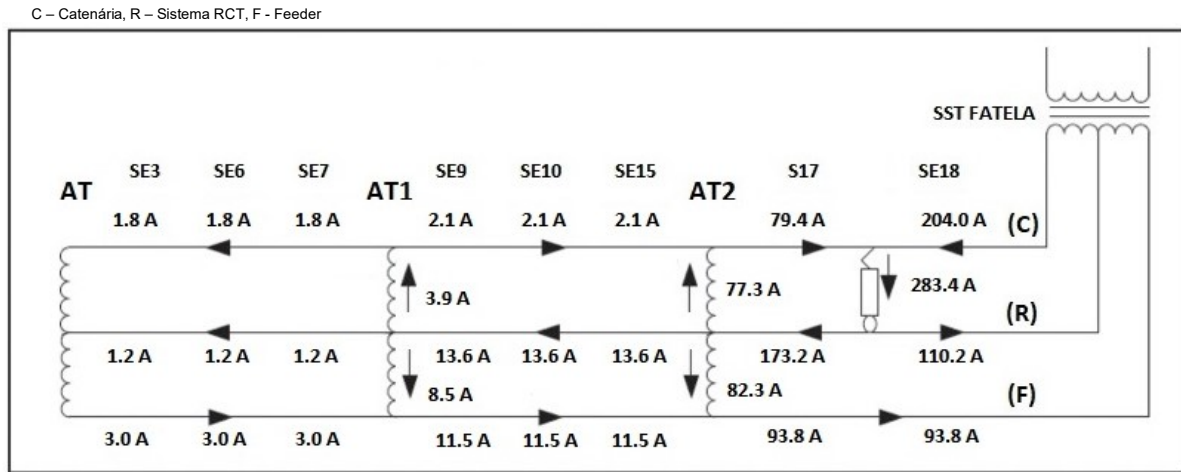


Figura 5.61 – Distribuição de correntes no sistema 2x25kV AC (Cenário 5).

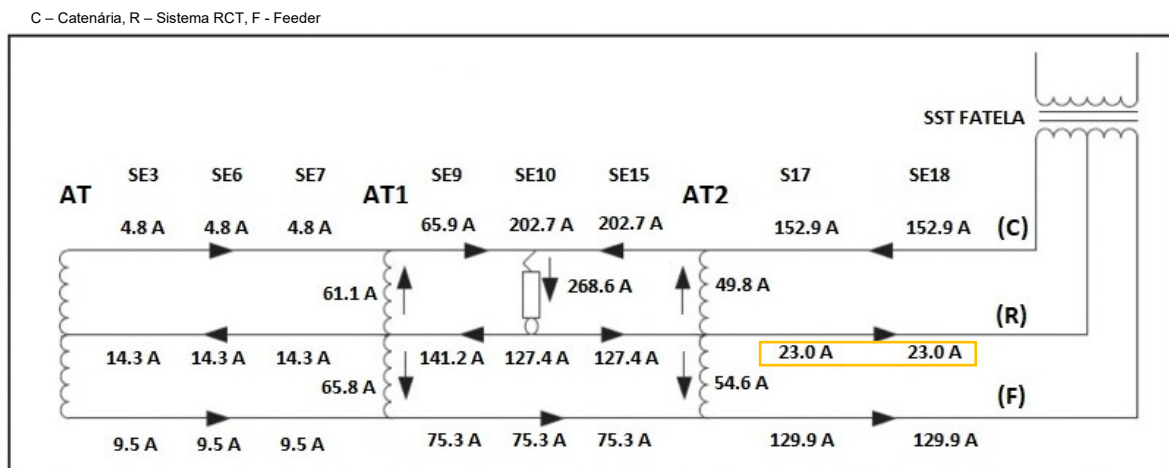


Figura 5.62 – Distribuição de correntes no sistema 2x25kV AC (Cenário 6).

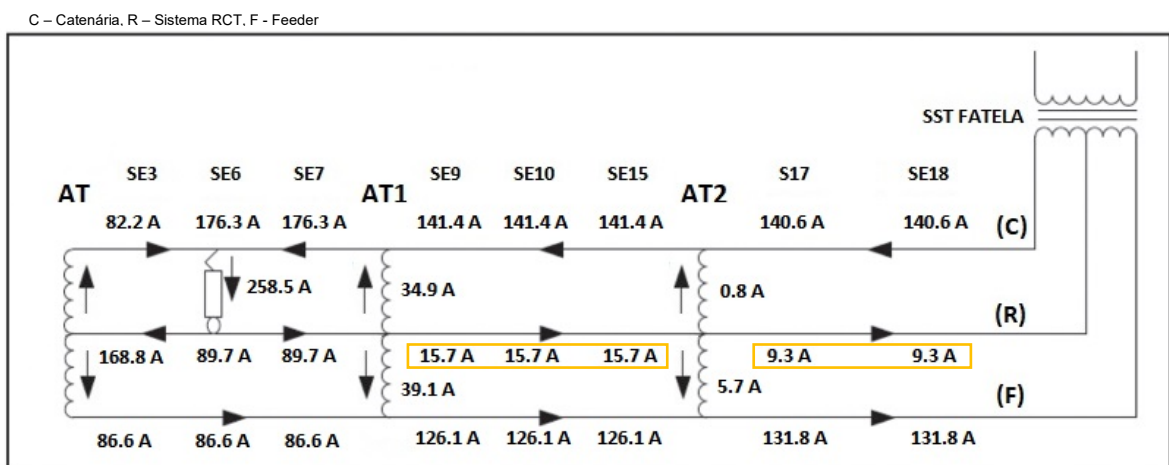


Figura 5.63 – Distribuição de correntes no sistema 2x25kV AC (Cenário 7).

5.4. COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS

Após a análise do sistema 1x25 kV no capítulo 5.2, para a linha do sul, troço compreendido entre a ZN do Montenegro e a ZN de São Marcos alimentado pela SST de Luzianes e do sistema 2x25 kV no capítulo 5.3, para a linha da Beira Baixa, troço compreendido entre a ZN de Alcains e o fim da linha eletrificada na estação da Covilhã alimentado pela SST da Fatela, torna-se imperativo comparar estes dois sistemas de forma equitativa. Para o efeito, criaram-se dois modelos, um para o sistema 1x25 kV e outro para o sistema 2x25 kV, com apenas 30 km de extensão na sua totalidade, ambos com três secções elementares. Para cada modelo, procedeu-se à simulação de oito cenários representados com a denominação de A a H, conforme se observa na Figura 5.64 e Figura 5.66. A cada cenário é atribuída a presença de uma ou duas locomotivas da série 5601 variando a sua posição ao longo do sistema. Por exemplo, para o cenário B, existe apenas uma carga aos 10 km do troço. Para o cenário G, observa-se a existência de duas cargas, uma aos 10 km e outra aos 30 km. Após a simulação de todos os cenários para os dois modelos, elaborou-se a Tabela 10 e a Tabela 11 com todos os valores respetivos das tensões e correntes no primário e secundário da SST, assim como nos pantógrafos dos comboios. Determinou-se ainda, a percentagem de desequilíbrio provocado pelas cargas monofásicas de tração à rede trifásica de alimentação para o barramento de entrada das SST (Luzianes ou Fatela) em relação ao barramento de origem de produção de energia (Sines ou Pocinho). Podem-se verificar estes valores através da leitura da Tabela 13 ou pela observação da Figura 5.65 e Figura 5.67 para os sistemas 1x25 kV e 2x25 kV respetivamente.

5.4.1. SISTEMA 1x25 kV

Cenário	Posição da(s) locomotiva(s)
A	X
B	X
C	X
D	X
E	X X
F	X X
G	X X
H	X X

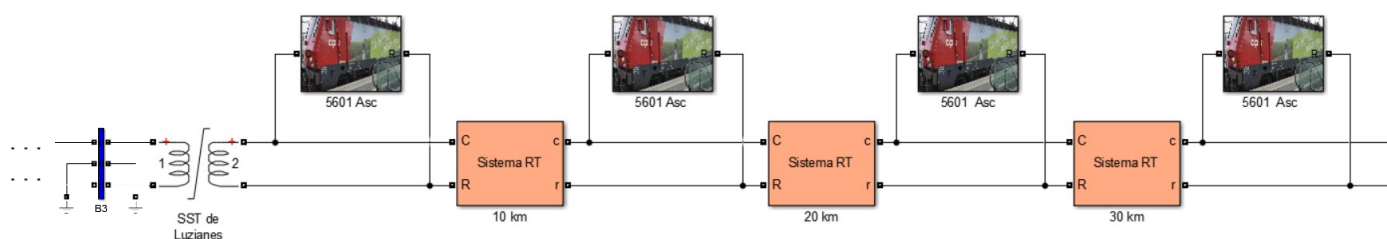


Figura 5.64 – Modelo do sistema 1x25 kV.

Tabela 10 – Resultados da simulação do sistema 1x25 kV.

Sistema 1x25 kV		SST Primário	SST Secundário	Carga 1	Carga 2
A	Tensão [kV]	148,36	25,33	25,33	---
B	Tensão [kV]	148,51	25,39	22,62	---
C	Tensão [kV]	148,56	25,49	20,27	---
D	Tensão [kV]	148,66	25,59	18,64	---
E	Tensão [kV]	146,53	23,37	23,37	20,81
F	Tensão [kV]	146,98	23,73	19,06	16,92
G	Tensão [kV]	147,10	23,85	19,26	15,57
H	Tensão [kV]	147,49	24,15	15,88	14,39

A	Corrente [A]	52,20	283,60	283,60	---
B	Corrente [A]	46,64	253,20	253,20	---
C	Corrente [A]	41,83	227,00	227,00	---
D	Corrente [A]	38,48	208,70	208,70	---
E	Corrente [A]	90,66	493,40	261,20	232,70
F	Corrente [A]	73,95	402,20	213,30	189,40
G	Corrente [A]	71,44	388,50	215,50	174,30
H	Corrente [A]	62,29	338,70	177,80	161,20

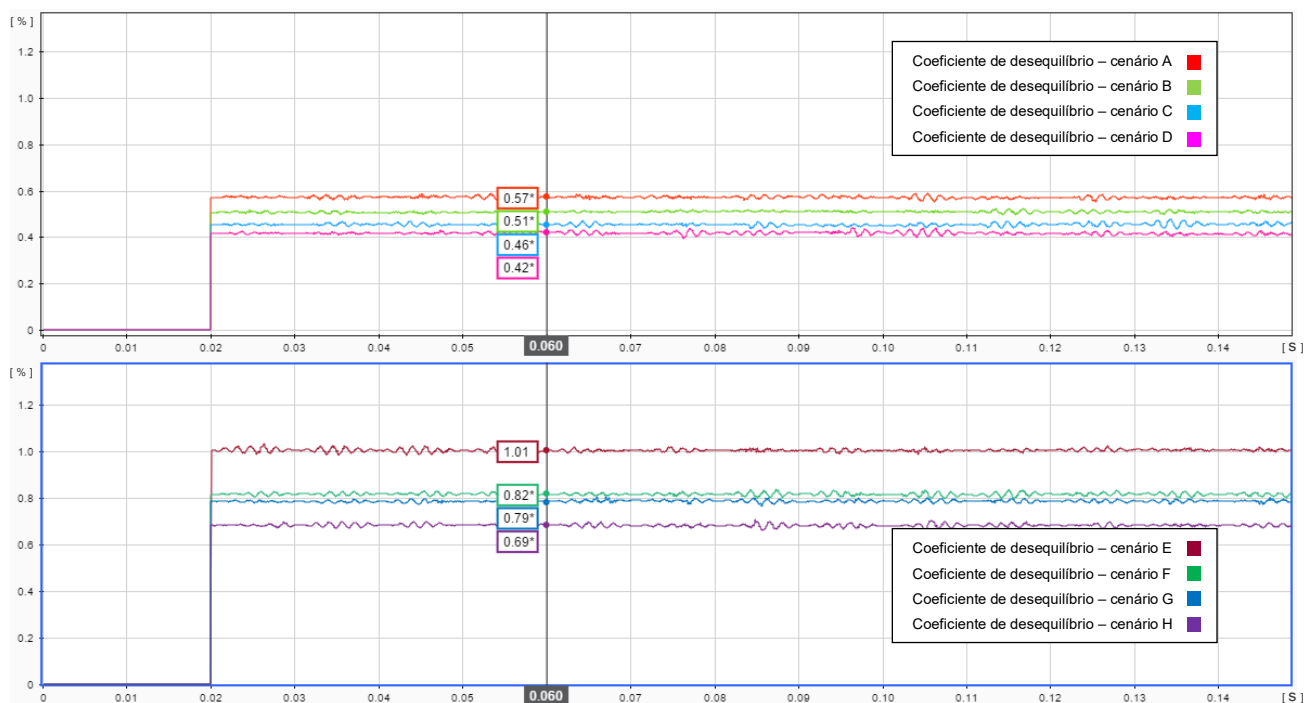


Figura 5.65 – Coeficientes de desequilíbrio - Sistema 1x25 kV.

5.4.2. SISTEMA 2x25 kV

Cenário	Posição da(s) locomotiva(s)
A	X
B	X
C	X
D	X
E	X X
F	X X
G	X X
H	X X

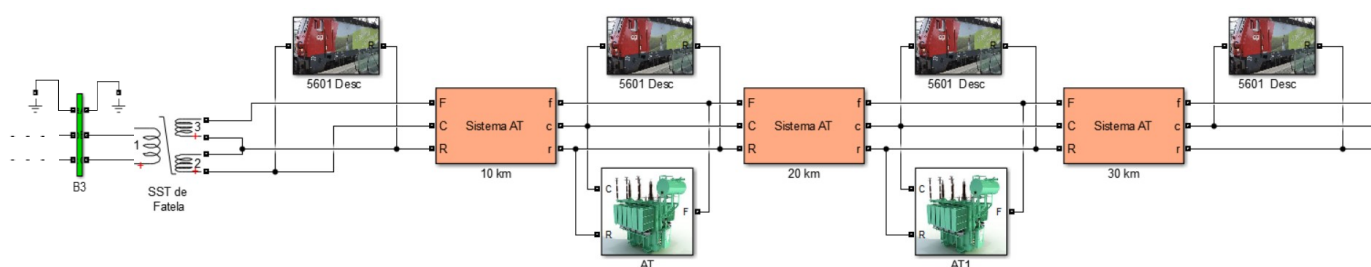


Figura 5.66 – Modelo do sistema 2x25 kV.

Tabela 11 – Resultados da simulação do sistema 2x25 kV.

Sistema 2x25 kV		SST Primário	SST Secundário			Carga 1	Carga 2
			Catenária-Carril	Feeder-Carril	Catenária-Feeder		
A	Tensão [kV]	219,04	26,22	26,73	52,96	26,23	---
B	Tensão [kV]	219,11	26,46	26,54	53,01	25,32	---
C	Tensão [kV]	219,08	26,49	26,51	53,00	24,43	---
D	Tensão [kV]	219,25	26,53	26,56	53,09	21,82	---
E	Tensão [kV]	217,99	25,19	25,76	50,94	25,19	24,30
F	Tensão [kV]	218,22	25,50	25,60	51,10	23,56	22,72
G	Tensão [kV]	218,45	25,56	25,70	51,28	23,67	20,30
H	Tensão [kV]	218,35	25,60	25,70	51,37	22,01	19,54

A	Corrente [A]	38,19	283,20	262,70	20,59	293,80	---
B	Corrente [A]	36,87	164,50	36,02	128,60	283,50	---
C	Corrente [A]	35,62	147,30	12,07	135,70	273,60	---
D	Corrente [A]	31,97	132,10	10,81	121,70	244,30	---
E	Corrente [A]	70,65	424,90	286,50	138,50	282,10	272,10
F	Corrente [A]	66,06	285,20	44,38	241,30	263,60	254,30
G	Corrente [A]	62,73	272,40	43,30	229,10	264,80	227,20
H	Corrente [A]	59,43	246,50	20,30	227,00	246,50	218,80

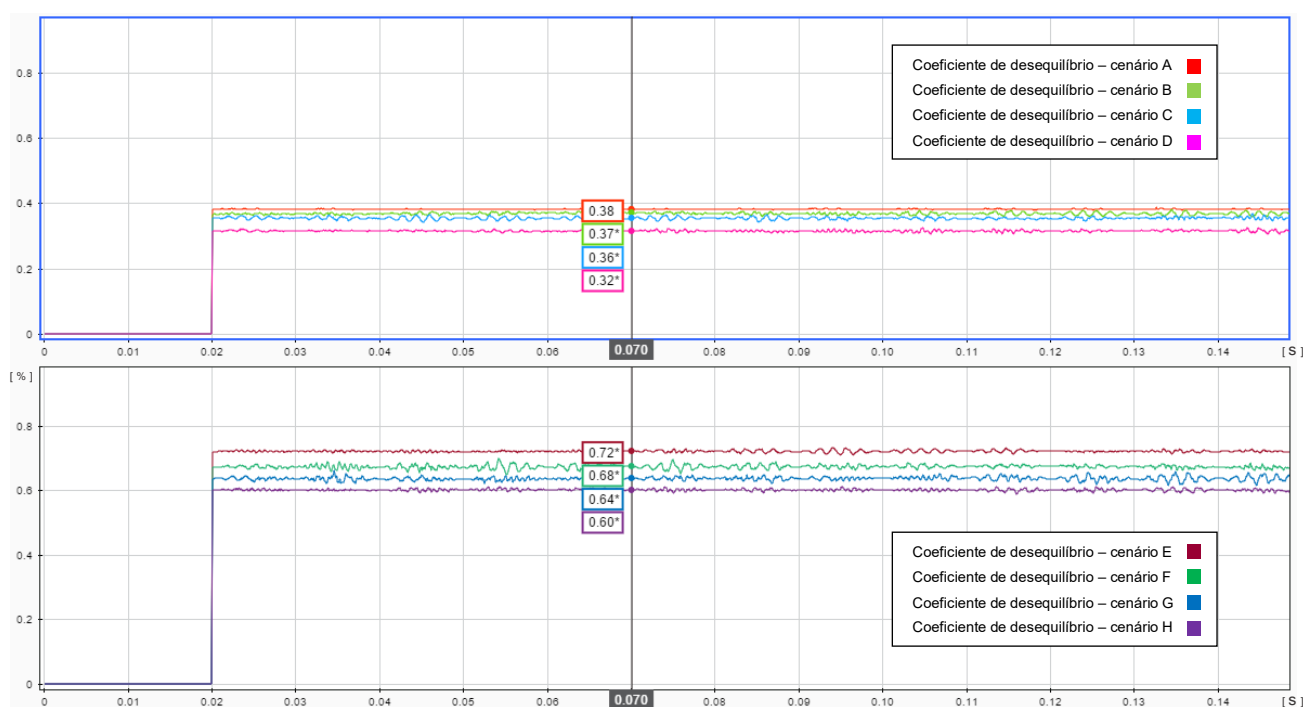


Figura 5.67 – Coeficientes de desequilíbrio - Sistema 2x25 kV.

5.4.3. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

É possível verificar, observando os resultados anteriores e pela comparação de resultados da Tabela 12, que o sistema 2x25 kV apresenta menores quedas de tensão em relação ao sistema 1x25 kV, pelo que as quedas de tensões no primário e secundário da SST no sistema 2x25 kV são cerca de 50% menores que em relação ao sistema 1x25 kV. No que diz respeito às tensões nos pantógrafos nas locomotivas, estas sofrem uma variação entre -12,0% e + 4,9% no sistema 2x25 kV ao invés de uma variação de -36,5% e 1,3% no sistema 1x25 kV quando circula apenas uma locomotiva. Quando circulam duas locomotivas as tensões nos pantógrafos sofrem uma variação entre -2,8% e -21,8% no sistema 2x25 kV ao invés de uma variação de -16,8% e -42,4% no sistema 1x25 kV. É possível observar que as correntes máximas no primário são de 90,66 A e 70,65 A, para os sistemas 1x25 kV e 2x25 kV respetivamente. Desta forma, quando circulam duas locomotivas num regime de carga constante e permanente, verifica-se que a SST de Luzianes se encontra em sobrecarga pois encontra-se 13,3% acima da sua capacidade máxima (80 A) enquanto que a SST da Fatela se situa a 77,7% da sua capacidade máxima (90,9 A). Observando a Figura 5.65 e a Figura 5.67, verifica-se um maior desequilíbrio provocado pelas cargas monofásicas de tração sempre que estas se encontram junto das respetivas SST (nas secções elementares mais próximas de SST) e que à medida que as cargas se afastam das SST este desequilíbrio diminui.

O coeficiente de desequilíbrio atinge um valor máximo de 1,01% no barramento de entrada da SST para o cenário E do sistema 1x25 kV, cenário este que representa a circulação de duas cargas de tração, uma aos zero e outra aos dez quilómetros de distância da SST. Comparando os valores da Tabela 13, verifica-se que os desequilíbrios existentes no sistema 2x25 kV são menores que os desequilíbrios existentes no sistema 1x25 kV, sendo por exemplo cerca de 33% menor para o cenário A e cerca de 12% menor para o cenário H.

Tabela 12 – Comparação de resultados de tensões.

	Sistema 1x25 kV				Sistema 2x25 kV			
	SST Primário	SST Secundário	Carga 1	Carga 2	SST Primário	SST Secundário	Carga 1	Carga 2
	150 kV	27,5 kV	25 kV	25 kV	220 kV	27,5 kV	25 kV	25 kV
A	-1,1%	-7,9%	1,3%	---	-0,4%	-4,7%	4,9%	---
B	-1,0%	-7,7%	-9,5%	---	-0,4%	-3,8%	1,3%	---
C	-1,0%	-7,3%	-18,9%	---	-0,4%	-3,7%	-2,3%	---
D	-0,9%	-6,9%	-25,4%	---	-0,3%	-3,5%	-12,7%	---
E	-2,3%	-15,0%	-6,5%	-16,8%	-0,9%	-8,4%	0,8%	-2,8%
F	-2,0%	-13,7%	-23,8%	-32,3%	-0,8%	-7,3%	-5,8%	-9,1%
G	-1,9%	-13,3%	-23,0%	-37,7%	-0,7%	-7,1%	-5,3%	-18,8%
H	-1,7%	-12,2%	-36,5%	-42,4%	-0,8%	-6,9%	-12,0%	-21,8%

Tabela 13 – Comparação de resultados de coeficientes de desequilíbrio.

	Sistema 1x25 kV	Sistema 2x25 kV
	Coeficiente de desequilíbrio	Coeficiente de desequilíbrio
A	0,57%	0,38%
B	0,51%	0,37%
C	0,45%	0,35%
D	0,42%	0,31%
E	1,01%	0,72%
F	0,81%	0,67%
G	0,79%	0,63%
H	0,68%	0,60%

6. CONCLUSÕES

Sendo o objetivo desta dissertação efetuar uma análise sobre o impacto que os sistemas de alimentação de catenária têm na própria rede de tração elétrica e na rede trifásica de transmissão de energia, após a caracterização da catenária, dos postos de catenária, SST, tipos de ligação nos sistemas 1x25 kV e 2x25 kV e caracterização dos sistemas de RCT podem retirar-se as seguintes conclusões.

Nos sistemas 1x25 kV, o esquema de montagem que mais se utiliza é a de ligação bifásica não sendo obrigatório a existência de uma ZN junto à SST. Este tipo de montagem é o que introduz maiores desequilíbrios nas redes de alimentação trifásicas do distribuidor de energia. Na ligação trifásica, é obrigatório a existência de uma ZN entre cada setor sendo que cada transformador alimenta um setor de catenária e pode funcionar independentemente do outro estar ou não ao serviço. Com esta ligação procura-se um menor desequilíbrio na rede primária comparativamente ao provocado pela ligação bifásica. Na ligação bifásica, a escolha das fases de alimentação normalmente associada aos desequilíbrios já existentes na rede de alimentação e o desequilíbrio é de igual modo minimizado através da alternância de fases entre SST.

O sistema de alimentação 2x25 kV é implementado quando há escassez de pontos de alimentação, quando as fontes de fornecimento de energia da rede primária se encontram a grandes distâncias ou na implementação de linhas de alta velocidade. Este sistema permite com que haja um maior espaçamento entre SST e que se obtenham menores quedas de tensão na rede de tração uma vez que a alimentação se efetua a 50 kV. Ao longo da linha de catenária, é instalado o feeder negativo que apresenta uma diferença de potencial de -25 kV em relação à terra e de 50 kV em relação à catenária. Neste sistema, são utilizados autotransformadores para interligar a catenária, o feeder negativo e o sistema de RCT, garantindo a circulação de corrente no sistema de retorno à passagem de um comboio apenas na zona delimitada por dois autotransformadores de tração. Desta forma, conseguem-se menores intensidades de corrente a passar pelo circuito de retorno e catenária. Face ao maior número de equipamentos e complexidade do sistema, o custo de instalação e manutenção do sistema 2x25 kV é mais oneroso quando comparado com o sistema 1x25 kV.

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que a amplitude das tensões nos pantógrafos dos comboios para ambas as configurações diminuem com o aumento da distância da locomotiva à subestação de tração e com o número de comboios ao longo da seção de alimentação. Além disso, os resultados da simulação também indicam que a alimentação com autotransformadores (sistema 2x25 kV) tem vantagens em relação ao método de alimentação direta (sistema 1x25 kV) em termos de perfil de tensão nos pantógrafos. Foi também possível comprovar para o sistema 2x25 kV, que quando a carga se encontra entre dois autotransformadores de tração, a alimentação é feita através dos troços da catenária a montante e a jusante, devido ao efeito dos autotransformadores. Desta forma, a corrente elétrica de tração que circula através dos dois autotransformadores de tração retorna à SST maioritariamente através do feeder sendo a corrente que circula no sistema RCT mínima e drasticamente menor que as correntes que circulam no sistema RCT no sistema 1x25 kV. Verifica-se e conclui-se que os desequilíbrios existentes no sistema 2x25 kV são em média, cerca de 23% menores em relação aos desequilíbrios existentes no sistema 1x25 kV sendo, portanto, um sistema que permite minimizar os desequilíbrios provocados pelas cargas monofásicas de tração à rede trifásica de alimentação.

Conclui-se e confirma-se de igual forma os pressupostos definidos na instrução técnica GR.IT.GER.002 e pelas normas NP EN 50160 e 50163 [20], [30], [31] no que diz respeito aos parâmetros de alimentação dos sistemas de tração:

- A tensão na catenária deve estar dentro dos limites do padrão NP EN 50163, que significa uma tensão de linha nominal de 25 kV, uma tensão mínima de 19 kV em modo permanente e uma tensão mínima não permanente de 17,5 kV num tempo máximo de 10 minutos;
- A energia necessária nas estações de alimentação de tração, comutação e paralelo não deve exceder a capacidade instalada de energia. Além disso, o equipamento da SST de alimentação de tração deve ser capaz de suportar uma sobrecarga de 150% por 60 minutos e 200% por 5 minutos.

Pelo discutido anteriormente e pelos resultados das simulações presentes nas Tabelas 7 a 10 levam às seguintes análises e conclusões:

- Para o sistema 1x25kV da linha do Sul na extensão entre as secções da zona neutra de São Marcos à zona neutra do Montenegro, a tensão mínima da catenária é sempre acima de 24,21 kV, maior que o requisito mínimo de 19 kV em regime permanente, sendo, portanto, boa;
- Relativamente à carga máxima na SST de Luzianes a potência nominal de 12 MVA para cada um dos 2 transformadores da SST é suficiente, pois as correntes no primário da SST oscilam entre os 42,6 A e 51,4 A e entre os 30,8 A e 67,0 A, quando circulam um ou dois comboios nos setores alimentados por esta SST num regime de carga constante e permanente, respetivamente;

- Para o sistema 2x25kV da linha da Beira Baixa na extensão entre as secções da zona neutra de Alcains até ao fim da via eletrificada na estação da Covilhã, a tensão mínima da catenária é sempre acima de 25,02 kV, maior que o requisito mínimo de 19 kV em regime permanente, sendo, portanto, excelente;
- Relativamente à carga máxima na SST da Fatela a potência nominal de 20 MVA para cada um dos 2 transformadores da SST é suficiente, pois as correntes no primário da SST oscilam entre os 33,6 A e 38,1 A e entre os 30,6 A e 66,5 A, quando circulam um ou dois comboios nos setores alimentados por esta SST num regime de carga constante e permanente, respetivamente.

Pode-se concluir que os resultados obtidos em ambos os sistemas confirmam os padrões da indústria indicando o correto uso dos métodos matemáticos desenvolvidos nos diversos modelos e correta aplicação dos blocos de simulação do Matlab/Simulink para os sistemas de alimentação da rede elétrica de tração e rede trifásica de transmissão de energia.

6.1. TRABALHO FUTURO

A partir dos resultados das simulações, pode-se observar que, embora nas subestações de tração, comutação e paralelo, as tensões de catenária necessárias, os transformadores e os autotransformadores estão consideravelmente bem dimensionados, caso por motivos de exploração, se pretenda aumentar a atual circulação ferroviária, será necessário realizar mais simulações para:

1. Verificar o número máximo de comboios que podem ser operados por hora e por direção com as atuais configurações dos equipamentos;
2. Se o número de conjuntos de comboios que podem ser operados não atender aos requisitos de exploração, verificar qual combinação razoável de comboios que a atual SST suporta;
3. Determinar quais alterações devem ser feitas na atual SST para suportar a operação do número pretendido de comboios por hora e direção.

Considera-se também importante, realizar uma análise de uma rede de tração mais complexa, com maior número de barramentos e subestações de tração. Nas SST pretende-se também implementar blocos de simulação de transformadores de potência com regulação de tomadas automática, permitindo alterar a tensão no secundário do transformador, de forma a compensar eventuais variações lentas na tensão da rede de alimentação, conferindo assim maior autonomia e flexibilidade na exploração da rede que se encontra a jusante do transformador. Face a algumas limitações do software utilizado na presente dissertação (Matlab/Simulink), sugere-se a utilização de software específico da indústria elétrica e ferroviária tal como o eTraX™ [32].

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Referências

- [1] M. Vaz Guedes, “Introdução à tração elétrica,” 2000. [Online]. Available: <https://www.eletricidade.net/fotos/locomotiva.pdf>. [Acedido em 01 07 2018].
- [2] Infraestruturas de Portugal, “Infraestrutura Ferroviária-Energia de tração,” IET77 - Segurança Ferroviária, 11 Maio 2016.
- [3] Rui de Carvalho Costa Pereira, Análise ao Sistema de Alimentação de Tração Elétrica, Dissertação de Mestrado, Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013.
- [4] Caminhos de Ferro Portugueses, “Regulamento Geral de Segurança,” RGS - IX, 01 Junho 1995.
- [5] Diário da República, “n.º48,” Despacho n.º 5255/2006, 8 Março 2006.
- [6] REFER, “Equipamentos de Alta Tensão,” Manual de Formação - Energia de Tração, Maio 2012.
- [7] Instituto da Mobilidade e dos Transportes Terrestres, “Instrução de exploração técnica n.º 77,” Normas e Procedimentos de Segurança em Trabalhos na Infraestrutura Ferroviária, 15 Junho 2009.
- [8] REFER, “Desfasamentos e Diferenças de Potencial na Rede de Tração AC,” GR.IT.ENT.004 v.0, 17 12 2014.
- [9] Infraestruturas de Portugal, “Infraestrutura Ferroviária-Catenária,” IET77 - Segurança Ferroviária, 24 05 2018.
- [10] REFER, “Tração Elétrica a 25 kV - 50 Hz,” IT/DEL/102, 09 1973.
- [11] REFER, “Linhas Aéreas para Tração Elétrica Ferroviária 25 kV-50 Hz,” IT.CAT.034 v.6, 02 03 2012.
- [12] Fernave, “Segurança Ferroviária para Técnicos,” Catenária, 23 Julho 2008.
- [13] REFER, “Energização de Zonas Neutras,” PR.ENT.007 v0, 22 04 2014.

- [14] Infraestruturas de Portugal, “Terminologia,” [Online]. Available: <http://www.infraestruturas.deportugal.pt/negocios-e-servicos/lexico/z>. [Acedido em 06 01 2019].
- [15] REFER, “Esquemas Eléctricos de Princípio e Encravamentos nas Subestações,” IT.ENT.003, 18 04 2012.
- [16] Luís Miguel Pestana, “Transformadores Especiais,” Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, [Online]. Available: http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/lpestanda/textos%20de%20alunos/TransfEsp.htm#_Toc472797291. [Acedido em 08 02 2019].
- [17] Luís Manuel Ramos de Oliveira, Apontamentos de Comando e Protecção de Redes Eléctricas, Universidade do Algarve, 2018.
- [18] FEUP, “Guia Técnico Subestações de Distribuição,” 13 03 2019. [Online]. Available: <https://paginas.fe.up.pt/~ee97153>.
- [19] REFER, “Retorno da Corrente de Tração, Terras e Protecções - Parte 2: Funcionamento do sistema de 25 kV,” GR.IT.GER.002 v6, 29 05 2015.
- [20] REFER, “Retorno da Corrente de Tração, Terras e Protecções - Parte 1: Generalidades,” GR.IT.GER.002 v6, 29 05 2015.
- [21] REFER, “Retorno da Corrente de Tração, Terras e Protecções - Parte 3: Introdução ao RCT+TP,” GR.IT.GER.002 v6, 29 05 2015.
- [22] REFER, “Retorno da Corrente de Tração, Terras e Protecções - Parte 13: Especificações dos Componentes,” GR.IT.GER.002 v6, 24 01 2016.
- [23] Mathworks, “Matlab Simulink,” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/>. [Acedido em 06 04 2019].
- [24] REN, “Caracterização da rede nacional de transporte para efeitos de acesso à rede,” 2019.
- [25] Bruno Filipe Silva Serôdio, Estudo e Avaliação dos Impactes da passagem de linhas aéreas para cabos subterrâneos, Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2009.
- [26] Luís Manuel Ramos de Oliveira, Apontamentos de Sistemas de Energia Eléctrica, Universidade do Algarve, 2017.

- [27] Thanatchai Kulworawanichpong Kritsada Mongkoldee, “Current-based Newton-Raphson power flow calculation for AT-fed railway power supply systems,” <https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-electrical-power-and-energy-systems>. [Acedido em 30 06 2019].
- [28] Infraestruturas de Portugal, “Comboios de Portugal - Frota de material circulante,” [Online]. Available: <https://www.cp.pt/institucional/pt/cultura-ferroviaria/frota-material-circulante>. [Acedido em 02 06 2019].
- [29] EDP, “Manual da qualidade da energia elétrica,” Dezembro 2005.
- [30] ERSE, Manual de Procedimentos da Qualidade de Serviço, ERSE, 2017.
- [31] REN, Relatório da Qualidade de Serviço 2017, 2018.
- [32] ETAP, “Electrical Power System Analysis & Operation Software,” [Online]. Available: <https://etap.com/solutions/railways>. [Acedido em 30 08 2019].
- [33] REFER, “Medição de Terras em Subestações e Postos de Catenária,” PR.ENT.003 v0, 10 08 2012.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Autotransformador – O autotransformador distingue-se dos transformadores por apenas ter uma bobina de onde se extrai uma tomada para se obter a tensão secundária [6].

Catenária – Sistema de transporte de energia elétrica de tração de circulações ferroviárias, que inclui linhas aéreas formadas por um ou mais fios de contacto e um ou mais condutores longitudinais que, suportando mecanicamente aqueles, têm também função de transporte de energia elétrica [7].

Catenária principal – Quando se torna necessária a intervenção do Posto Central de Telecomando (PCT) para cortar ou restabelecer a tensão, são geralmente as catenárias de linhas de circulação (vias gerais de circulação) e, excepcionalmente as catenárias de linhas de resguardo (linhas secundárias), quando ligadas permanentemente à catenária da referida linha de circulação [4].

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 linhas de resguardo, linhas de cais em estações, as linhas de serviço de depósitos e oficinas, ramais particulares e linhas de formação. A alimentação de catenárias secundárias faz-se em geral a partir da catenária principal contígua [4].

Circuito de terra – Conjunto de condutores de terra e respetivo eléctrodo de terra [33].

Condutores – São elementos fundamentais nos sistemas de energia por ser através deles que é feita a condução de corrente elétrica. As ligações podem ser realizadas por condutores sem isolamento elétrico (condutores nus) ou por condutores com isolamento próprio [6].

Condutor de terra – Condutor destinado a ligar parte de uma instalação ou um aparelho ao eléctrodo de terra [33].

Continuidade longitudinal – Ligação entre os troços a montante e jusante do seccionamento [4].

Disjuntor – É um aparelho de corte e proteção concebido para interromper ou estabelecer a continuidade de um circuito elétrico. O disjuntor dispõe de poder de corte para correntes de defeito (curto-circuito) [6].

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 [33].

Feeder – Sistema de transporte de energia elétrica que alimenta a catenária, sendo constituído por linha aérea ou subterrânea eletricamente isolada da catenária, e que pode ser a ela ligada por equipamento elétrico conveniente [7].

Fio de contacto – Condutor que tem como função fornecer energia elétrica ao comboio através do contacto do pantógrafo [9].

Interruptor – É um aparelho de corte concebido para interromper ou estabelecer a continuidade de um circuito elétrico. O interruptor dispõe de poder de corte para correntes de carga nominais [6].

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 e sabe-se em qualquer momento, o estado físico de todo o equipamento existente nas instalações que dele dependem [4].

Postos auxiliares (PX) – 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 [4].

Postos de barramento (B) – São postos onde várias secções elementares são ligadas a um barramento através de interruptores. Em bifurcações ou em entroncamentos permitem realizar as operações de paralelo transversal e alimentação de linhas desviadas, realizando por vezes também a operação de continuidade longitudinal [4].

Posto de catenária – Instalação que agrega um conjunto de equipamentos com capacidade para seccionamento da catenária, medida e proteção [6].

Postos de ramal (R) – 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 [4].

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 [4].

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 [4].

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 [4].

Resistência de terra – Resistência elétrica medida entre um eletrodo de terra e a terra [33].

Seccionador – É um aparelho destinado a interromper ou estabelecer a continuidade de um circuito elétrico e que, sem poder de corte garantido, não deve ser manobrado em carga [6].

Secção elementar – É o menor troço de catenária que pode ser isolado eletricamente [4].

Sector – É o troço de catenária compreendida entre uma subestação e uma zona neutra ou entre uma Subestação e o fim de linha eletrificada [4].

Sector auxiliar – É o conjunto de subsectores compreendidos entre um Posto de Ramal e o fim de linha eletrificada do ramal [4].

Sistema de retorno de corrente de tração – conjunto de condutores longitudinais à via, com ligações transversais regulares, que, em conjunto com um ou os dois carris, garantem um caminho seguro para a corrente de tração entre os comboios e a subestação. Nas eletrificações em corrente alternada tem a função de terra geral, encontrando-se alguns dos seus condutores em contacto à terra, nomeadamente o cabo de terra enterrado. Nas eletrificações em corrente contínua tem a função de terra de serviço [6].

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 [4].

Subestação de tração (SST) – Instalação cuja principal função é adaptar as características da tensão da rede alimentação às características necessárias ao fornecimento de energia elétrica ao material circulante através da catenária [6].

Terra – Massa condutora da terra com potencial convencionado como nulo [33].

Terras distintas – Dois circuitos de terra da mesma instalação dizem-se “distintos” se o potencial de um deles não sofra uma variação superior a 5% da que experimenta o outro quando este último é percorrido por uma corrente elétrica [33].

Tensão de contacto – Diferença de potencial entre uma estrutura metálica ligada à terra e um ponto na superfície do solo a uma distância horizontal convencionada de 1 metro [33].

Tensão de passo – Diferença de potencial entre dois pontos à superfície do solo separados por uma distância de um passo, convencionado de 1 metro, na direção do gradiente de potencial máximo [33].

Transformador – É uma máquina elétrica estática que tem como função a transferência de energia elétrica de um circuito a outro permitindo a modificação das amplitudes da tensão e da intensidade de corrente [6].

Zona comum – Para que não haja descontinuidade da captação de corrente pelos pantógrafos na passagem entre lanços de catenária consecutivos, os lanços são montados lado a lado, sendo o lanço uma extensão de catenária entre duas amarrações consecutivas ou seja, uma zona comum é uma zona de transição entre duas catenárias e que tem como principal função a separação mecânica das mesmas [11].

Zona de influência de uma terra – Área dentro da qual o potencial do solo sofre uma variação superior a 5% do que experimenta o elétrodo de terra respetivo, quando percorrido por uma corrente elétrica [33].

Zona neutra – Uma zona neutra é uma pequena extensão de catenária (30 metros) não alimentada eletricamente. Por regra, a cada subestação de tração encontra-se associada uma zona neutra. Entre duas subestações de tração contíguas, existe sempre uma zona neutra. Uma zona neutra é construída de tal forma que permite a passagem de todos os pantógrafos das unidades motoras sem qualquer imposição de ordem mecânica, apenas determina uma imposição de ordem elétrica, que é a obrigatoriedade de desligar o disjuntor da unidade motora [4], [13].

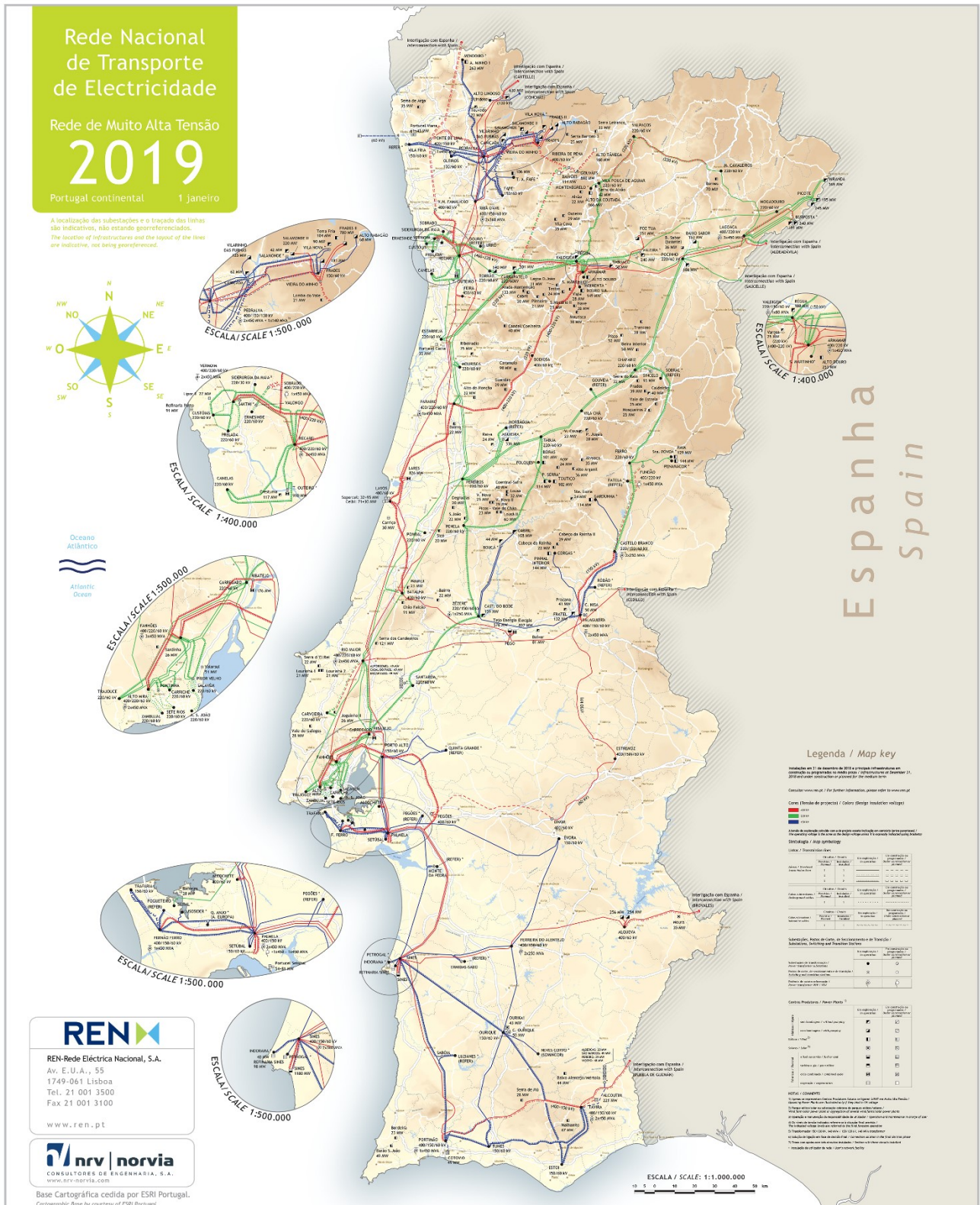
Zona neutra convencional – Em cada uma das extremidades existe uma zona comum. Nestas zonas comuns cada pantógrafo toca simultaneamente em duas catenárias, sendo uma a da zona neutra [4].

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Anexo I – Rede Nacional de Transporte de Eletricidade	104
Anexo II – Linhas e Ramais da Rede Ferroviária Nacional	105
Anexo III – Subestações de Tração Elétrica.....	106
Anexo IV – Troços de Linha Eletrificada	107
Anexo V – Diagrama Unifilar de Trânsito na RNT	108
Anexo VI – Esquema Longitudinal de Catenária de Luzianes.....	109
Anexo VII – Esquema Longitudinal de Catenária de Fatela	113

Anexo I

Rede Nacional de Transporte de Electricidade



Anexo II

Linhas e Ramais da Rede Ferroviária Nacional



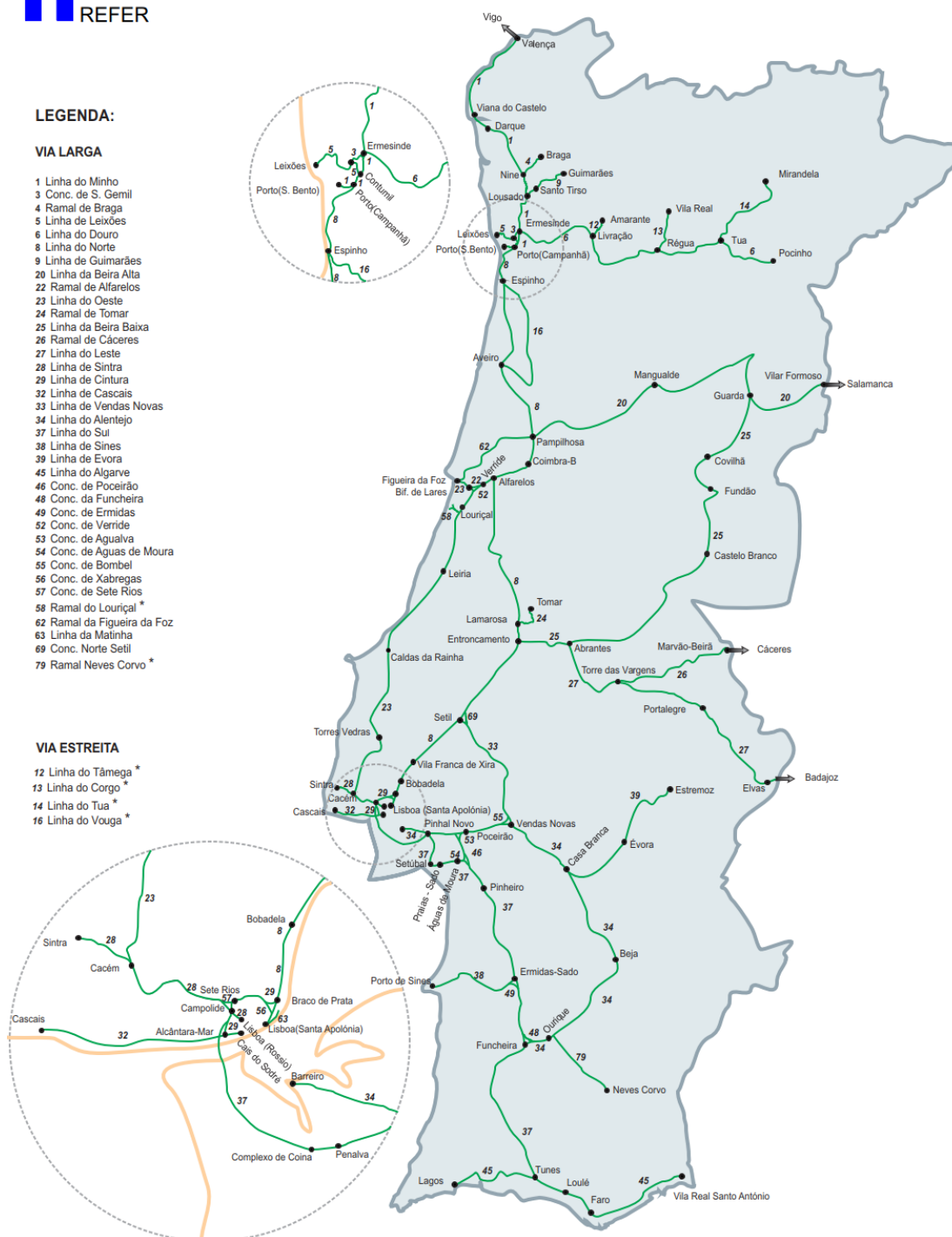
LEGENDA:

VIA LARGA

- 1 Linha do Minho
- 3 Conc. de S. Gemil
- 4 Ramal de Braga
- 5 Linha de Leixões
- 6 Linha do Douro
- 8 Linha do Norte
- 9 Linha de Guimarães
- 20 Linha da Beira Alta
- 22 Ramal de Alfaielos
- 23 Linha do Oeste
- 24 Ramal de Tomar
- 25 Linha da Beira Baixa
- 26 Ramal de Cáceres
- 27 Linha do Leste
- 28 Linha de Sintra
- 29 Linha de Cintura
- 32 Linha de Cascais
- 33 Linha de Vendas Novas
- 34 Linha do Alentejo
- 37 Linha do Sul
- 38 Linha de Sines
- 39 Linha de Évora
- 45 Linha do Algarve
- 46 Conc. de Póvoa
- 48 Conc. da Funcheira
- 49 Conc. de Ermidas
- 52 Conc. de Verride
- 53 Conc. de Agualva
- 54 Conc. de Águas de Moura
- 55 Conc. de Bombel
- 56 Conc. de Xabregas
- 57 Conc. de Sete Rios
- 58 Ramal do Lourçal *
- 62 Ramal da Figueira da Foz
- 63 Linha da Matinha
- 69 Conc. Norte Setil
- 79 Ramal Neves Corvo *

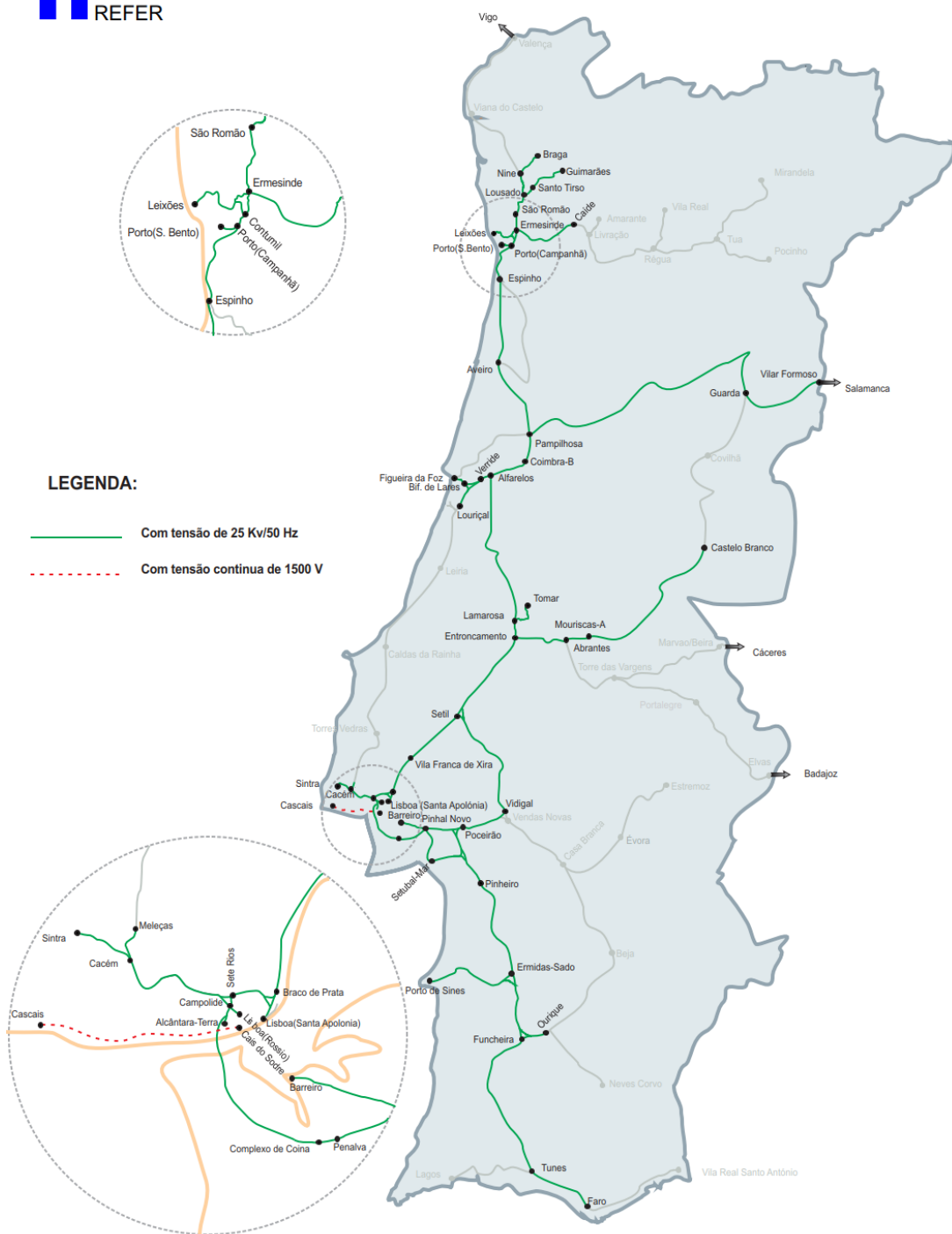
VIA ESTREITA

- 12 Linha do Tâmega *
- 13 Linha do Corgo *
- 14 Linha do Tua *
- 16 Linha do Vouga *



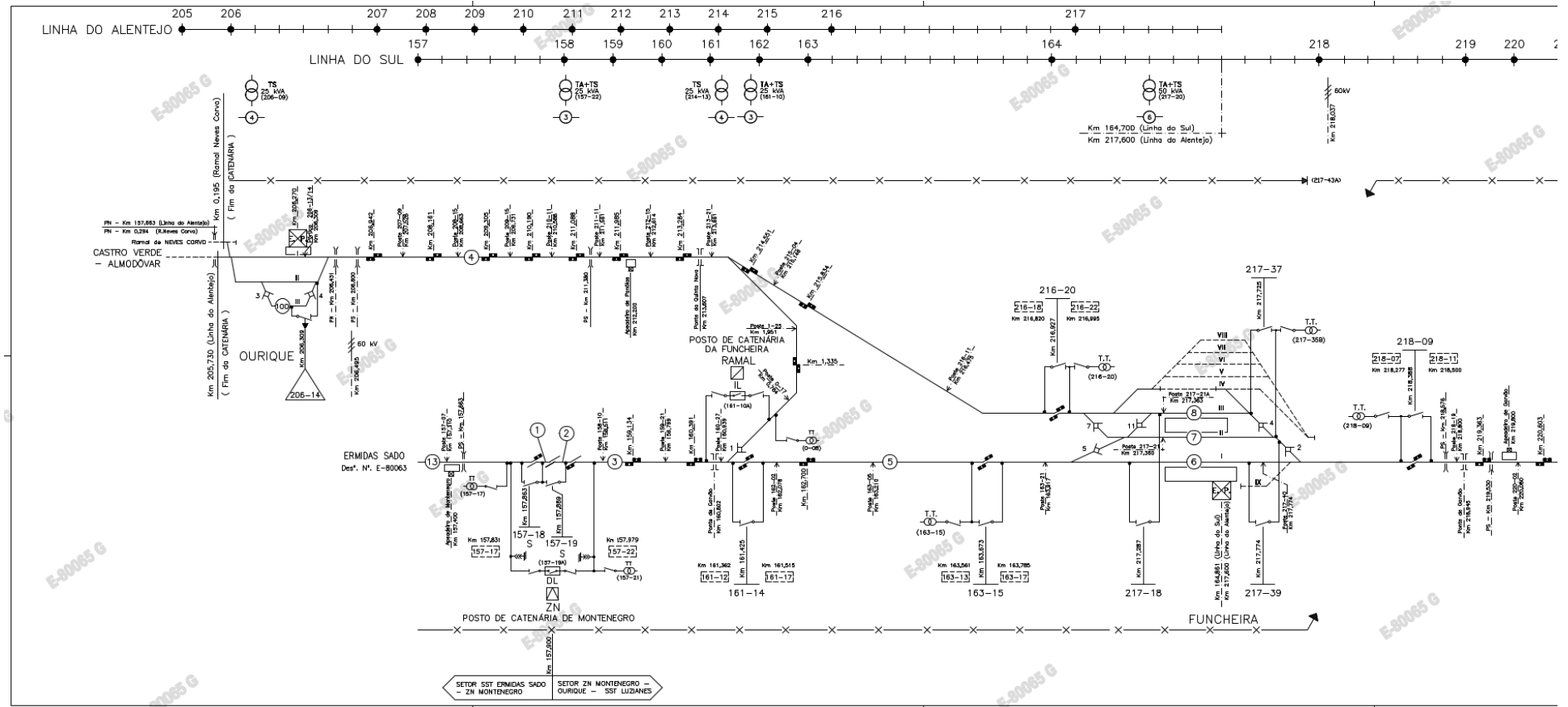
Anexo IV

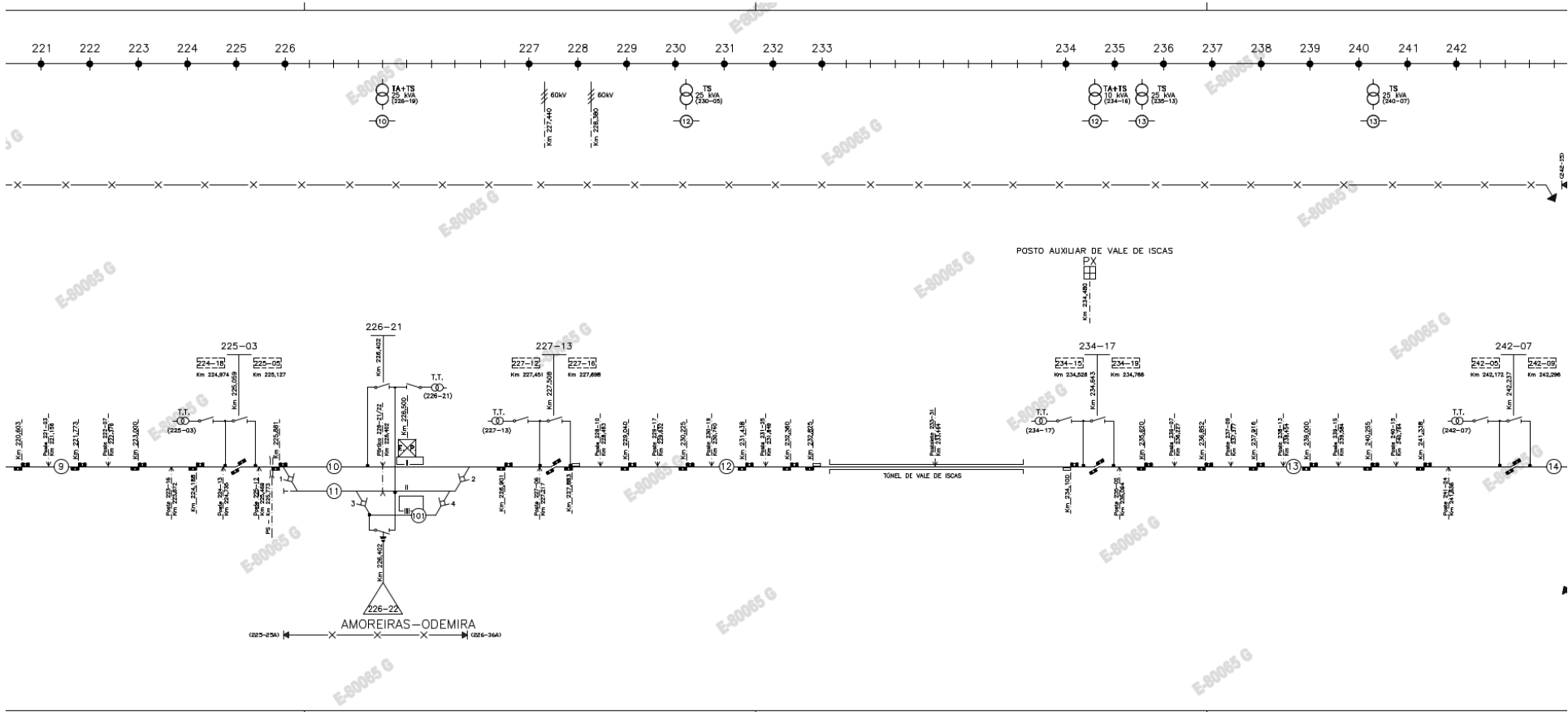
Troços de Linha Eletrificada

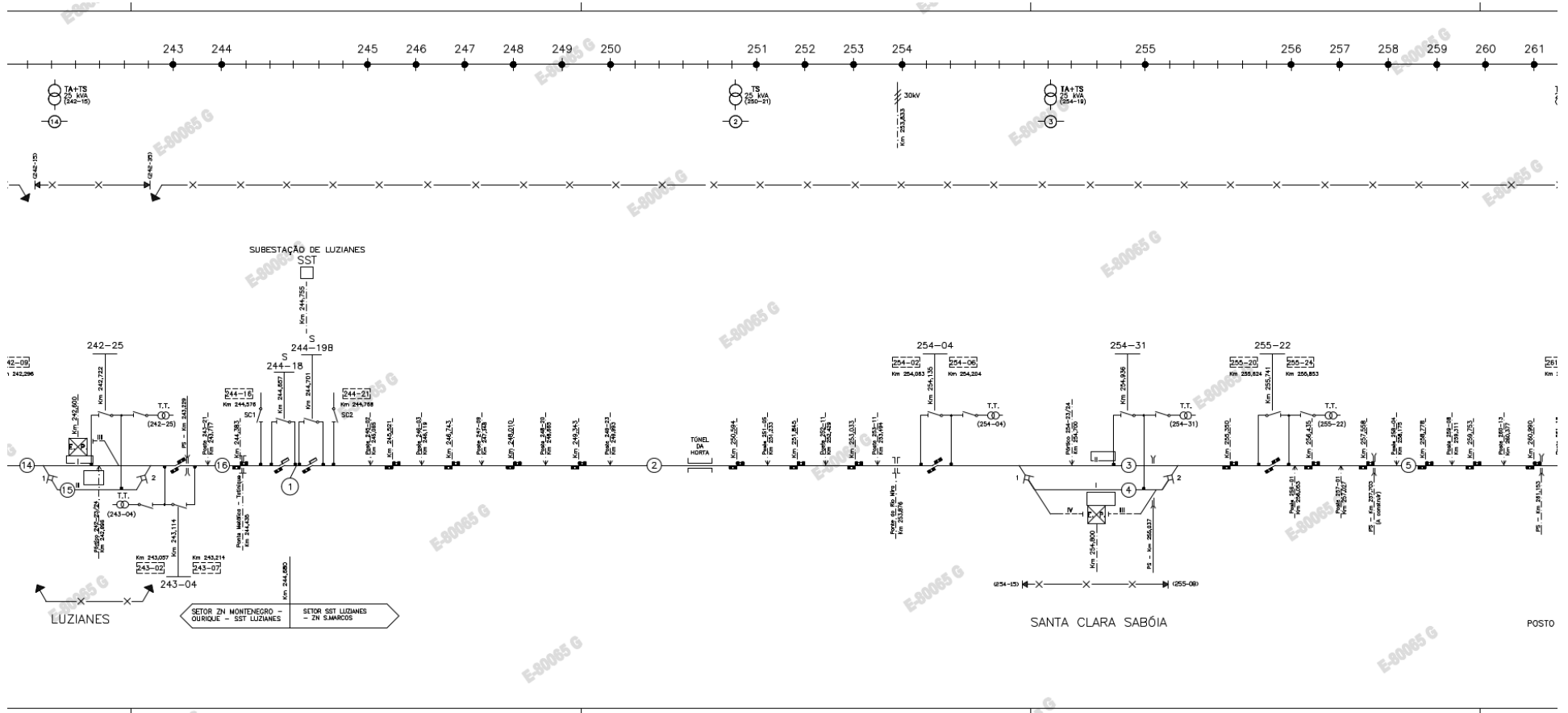


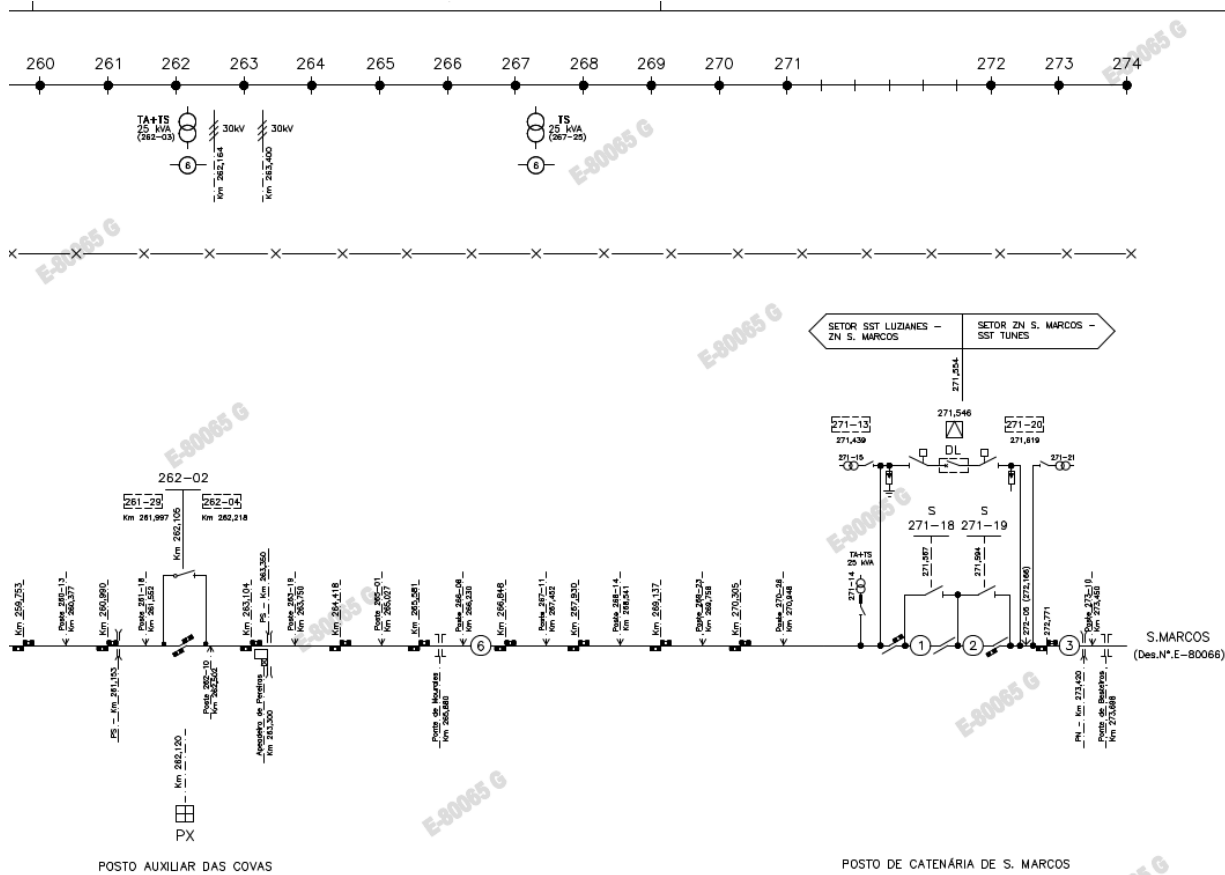
Anexo VI

Esquema Longitudinal de Catenária de Luzianes









Os quilómetros das postas limita são indicativas. Devem ser confirmados no terreno.
 Qualquer alteração ao esquema longitudinal deverá ser comunicada de imediato à Direcção de Asset Management - Divisão de Manutenção - Eletrotecnia.
 Este Esquema Longitudinal entra em vigor a partir de 15/11/2016 após confirmação de RI-CCS

SIMBOLOGIA			
—	Catenária Principal	—	Seccionador
—	Catenária Secundária	□	Comando Manual (Cot. Principals)
- - -	Via não Eletrificada	◇	Comando Manual (Cot. Secundárias)
—	Cabo de Terna (C.a.T.) (Aérea)	—	Comando Eléctrico (Do PCT)
—	Cabo de Terna (C.a.T.) (Subterrâneo)	—	Encovamento mecânico entre aparelhos E proibido ter ombros os aparelhos Reduzidos
—	Balivada de C.a.T.	—	Seccionador de terra
—	Ligação elétrica aérea - enterrada (LEAE)	—	Interruptor
—	Ligação transversal Integral (LTI)	—	Diljuntor
—	Isolamento do C.a.T.	—	Fusível
—	Faeder cabo nu	—	Transformador de Tensão
—	Isolamento do Faeder	—	Transformador de Alimentação
—	Amarração	—	Transformador de Intensidade
—	Antidesslizamento (C.S.)	—	Páris-Ribas
—	Antidesslizamento (F.C.)	—	Subestação de Trovão (SST)
—	Seção Elementar	—	Posto de Catenária (SP)
—	Poste Limite	—	Posto de Catenária (SS)
—	Isolador de Seção simétrico	—	Posto de Catenária (Ramal)
—	Isolador de Seção assimétrico	—	Posto de Catenária (Barramento-B)
—	Seccionamento de Linha de Ar	—	Posto Auxiliar (PX)
—	Zona Comum	—	Posto de Catenária (2N) - Via Única
—	Zona Neutra	—	Interruptor extra-t
—	Zona Neutra Seccionada		
—	Amarração fixa		
A	Amarração compensada FC		
—	Amarração compensada CS+FC		

NOTAS : * Seccionadores a telecomandar

A Alterações	Designação	Assinatura	Data
C	Nova representação do DN de S. Marcos	Joaquim Pina	11/16
F	Correção do PL do seccionador 216-20	Júlio Santos	01/13
E	Renumeração das Linhas II e IV em Sta Clara Saboia	Júlio Santos	07/08
D	Diagramagem do TA (234-03) + Legenda	António Lucas	06/08

Levantou	Data	Nome
Projectou		
Desenhou	16/04/2004	Aníbal Lucas
Verificou	27/04/2004	Rafino Carvalho



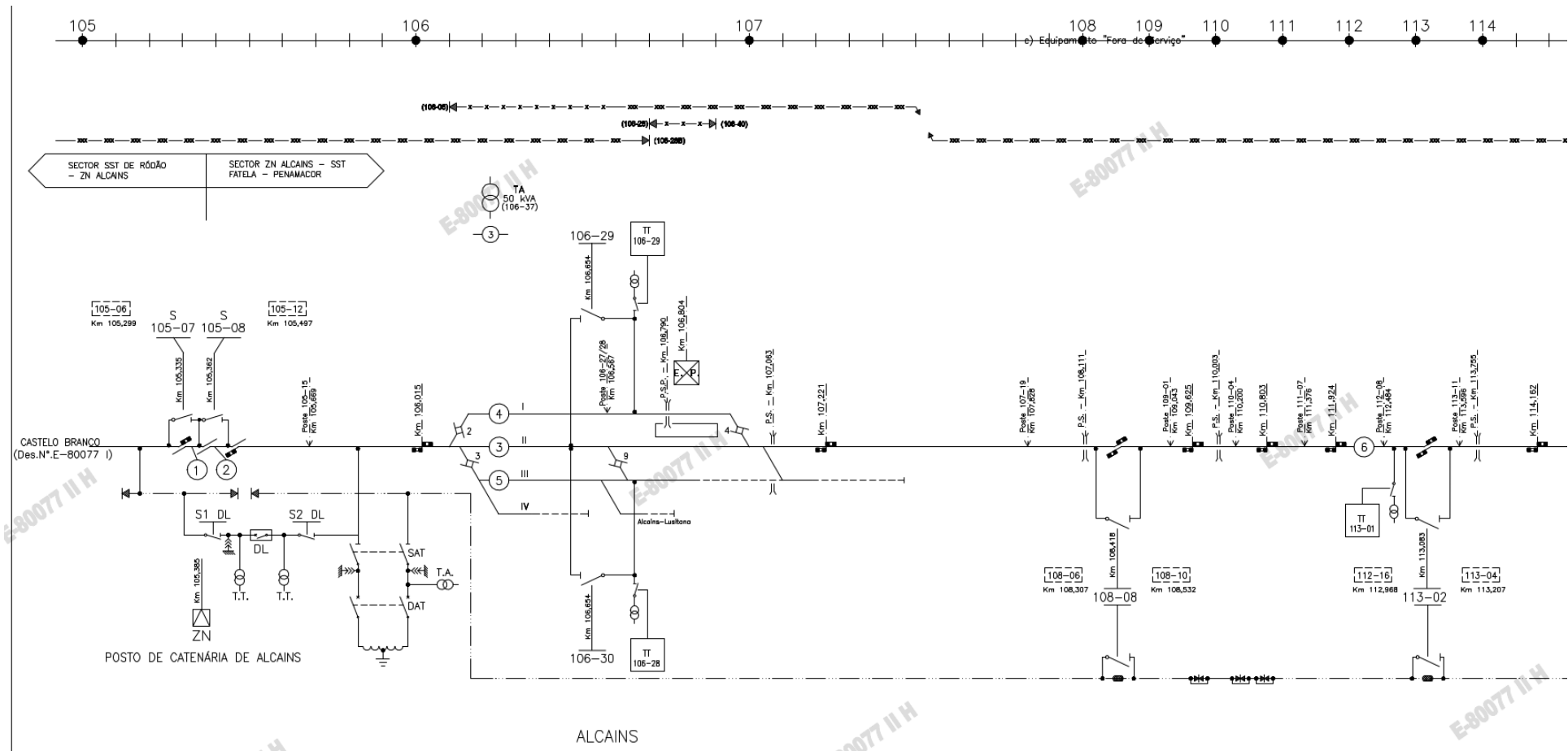
DIREÇÃO DE ASSET MANAGEMENT
 REVISÃO E MONITORIZAÇÃO
 ELETROTECNIA

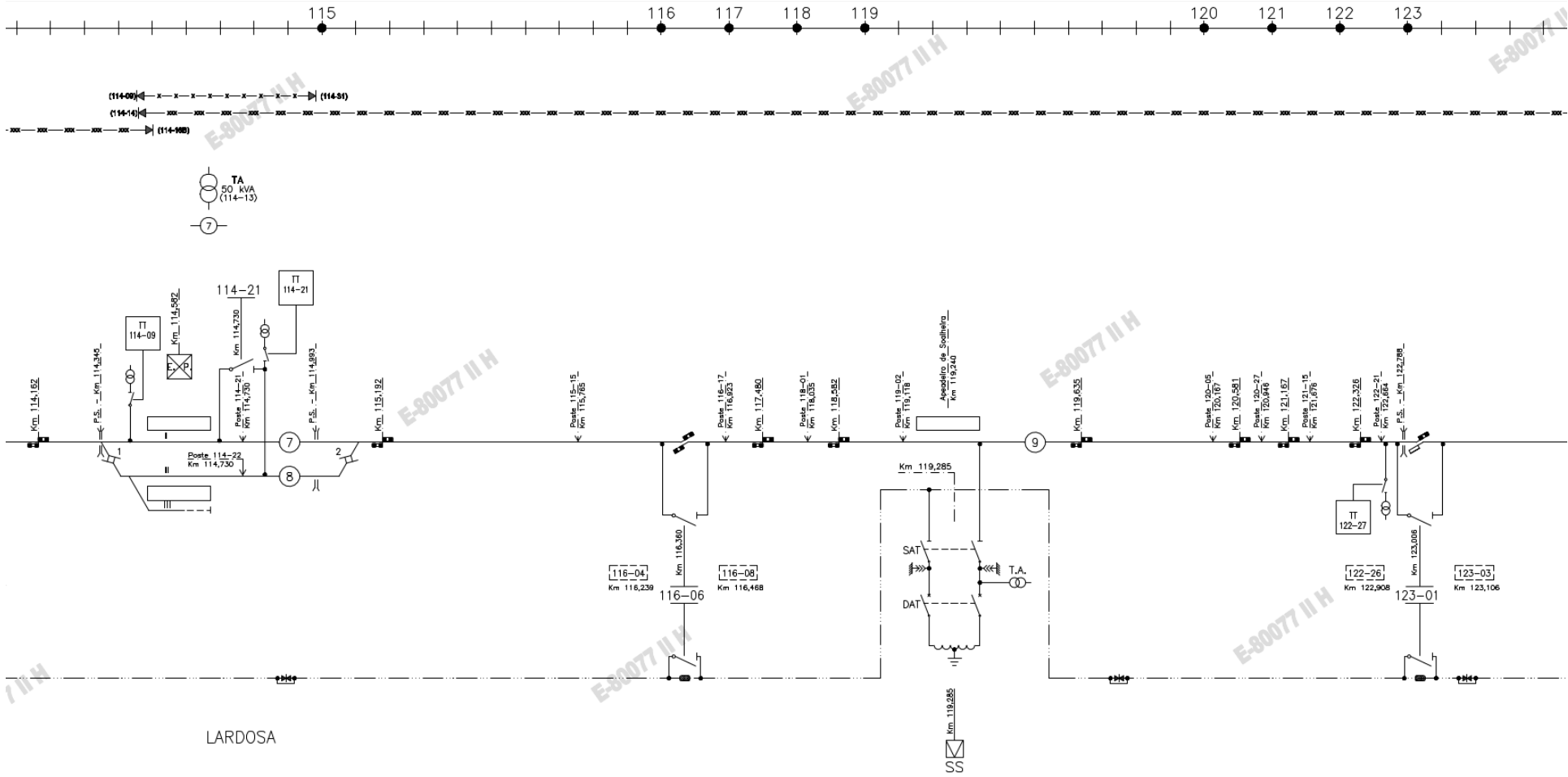
LINHAS DO SUL e ALENTEJO
 Esquema Longitudinal da Linha Eletrificada
 Setor ZN MONTENEGRO - OURIQUE - SST LUZIANES - ZN S.MARCOS

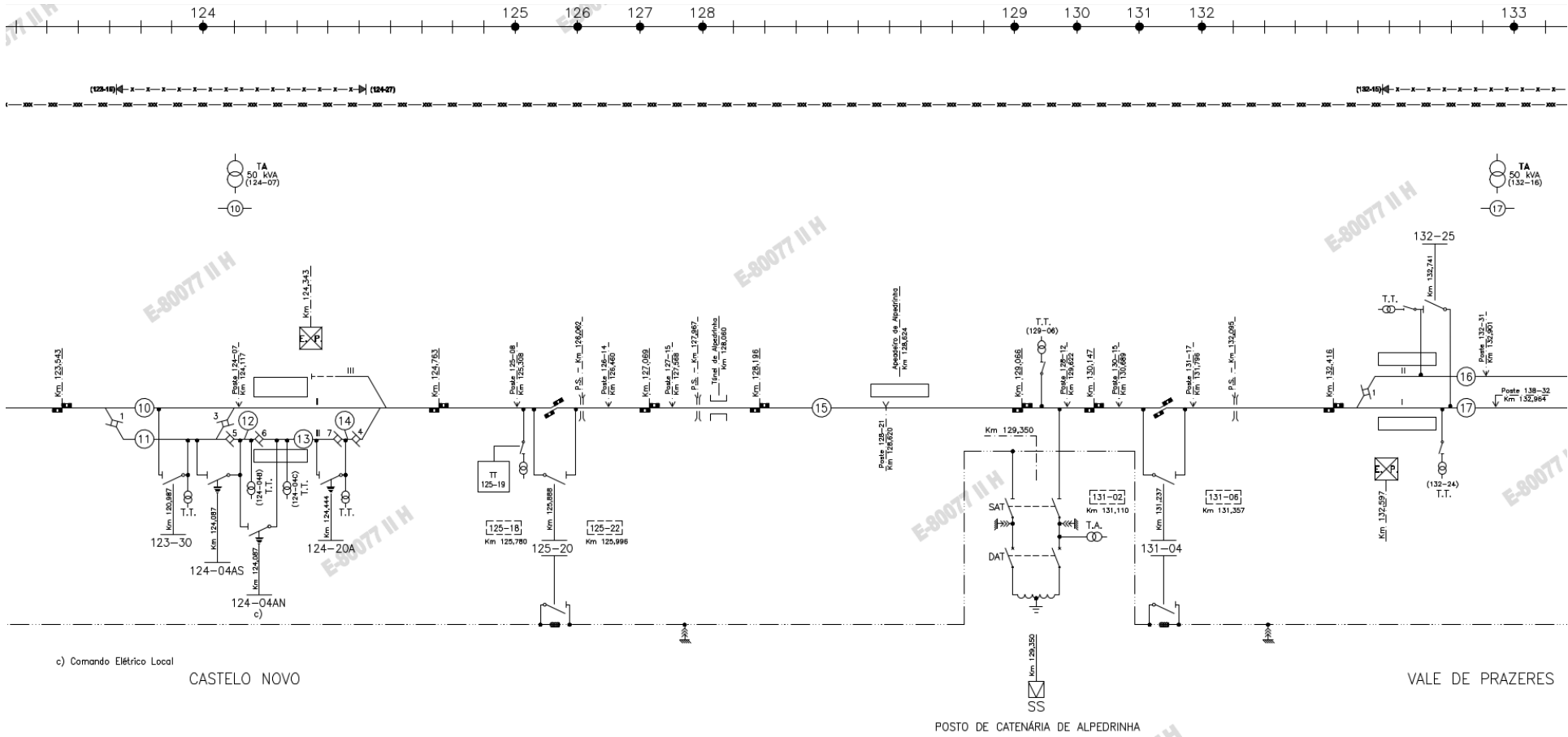
DES* N° **E-80065**
 O Trabalho Data:
 26/04/04
VERSÃO PORTAL

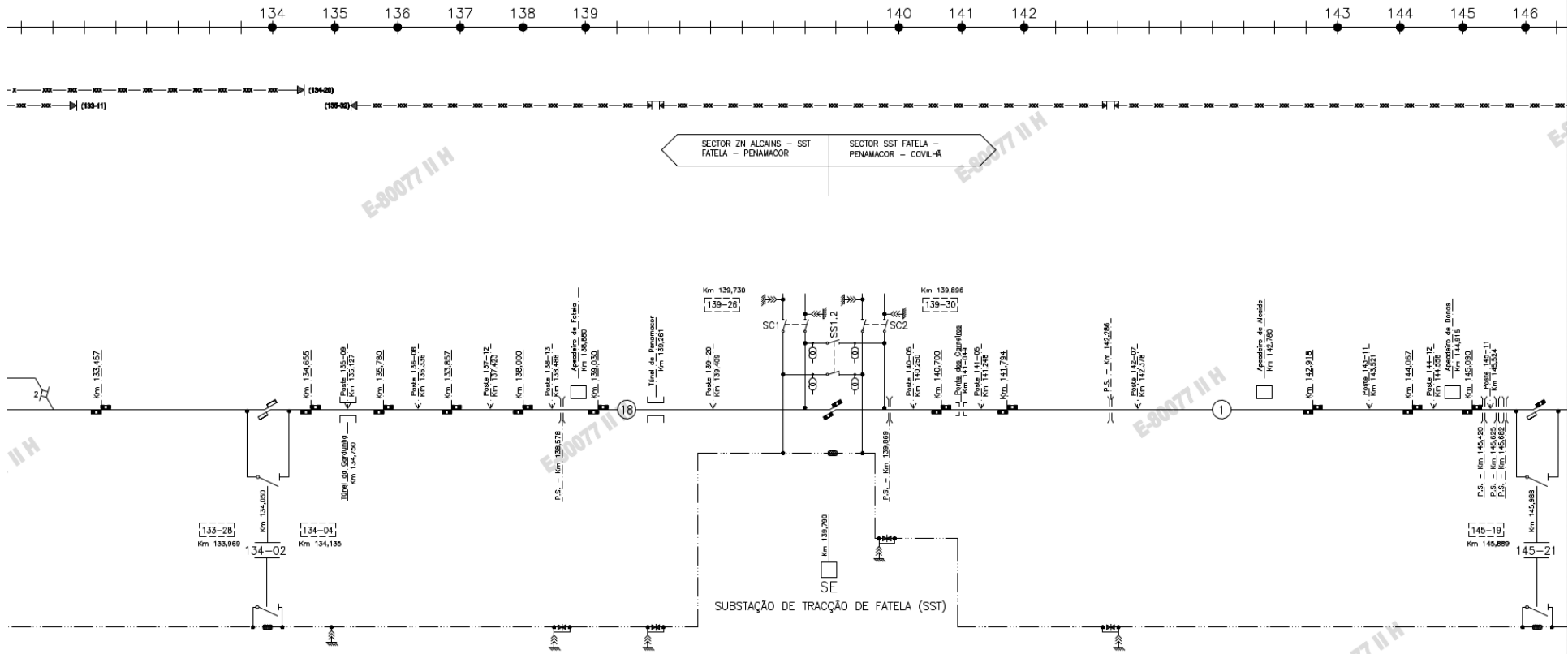
Anexo VII

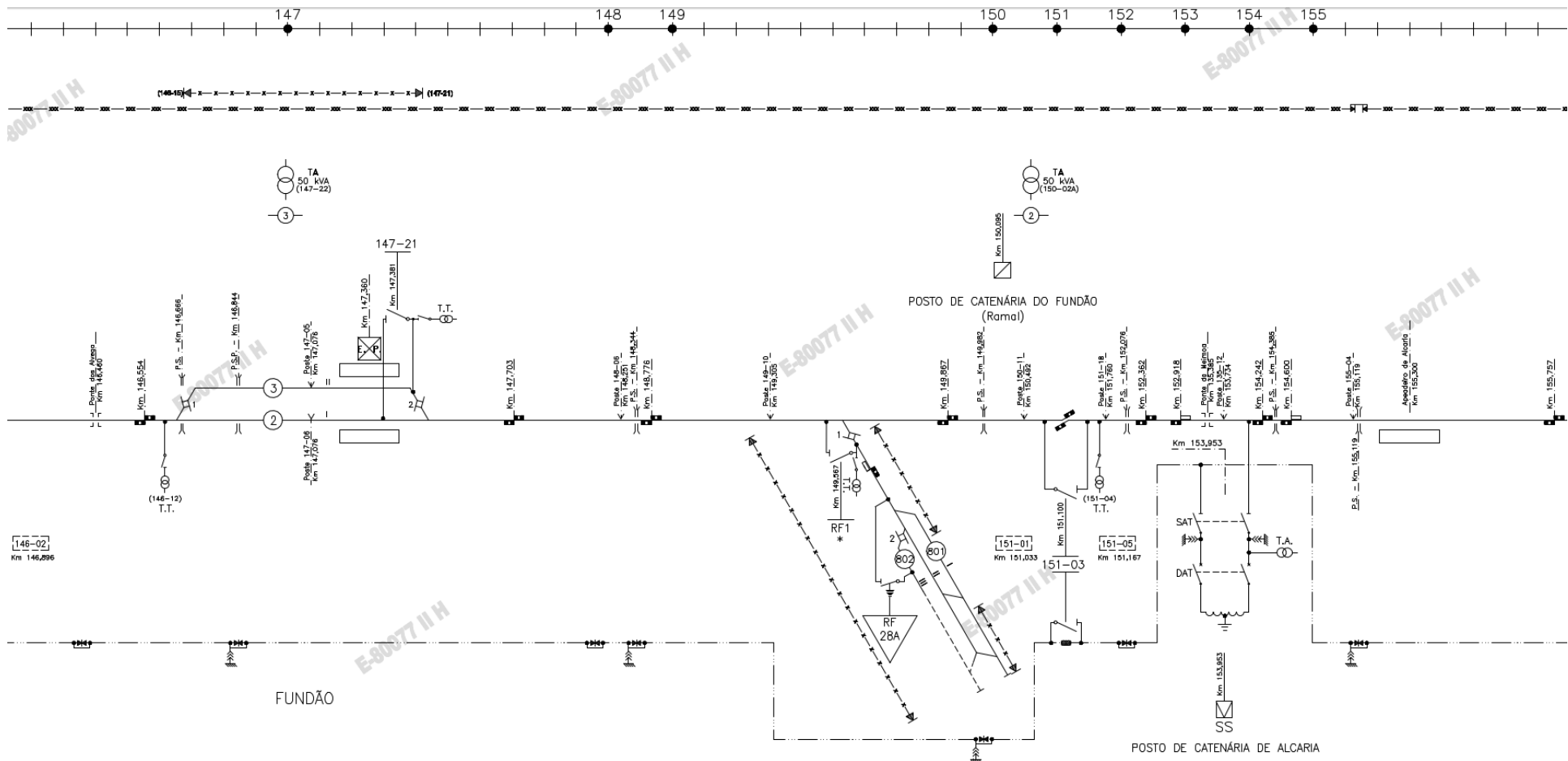
Esquema Longitudinal de Catenária de Fatela

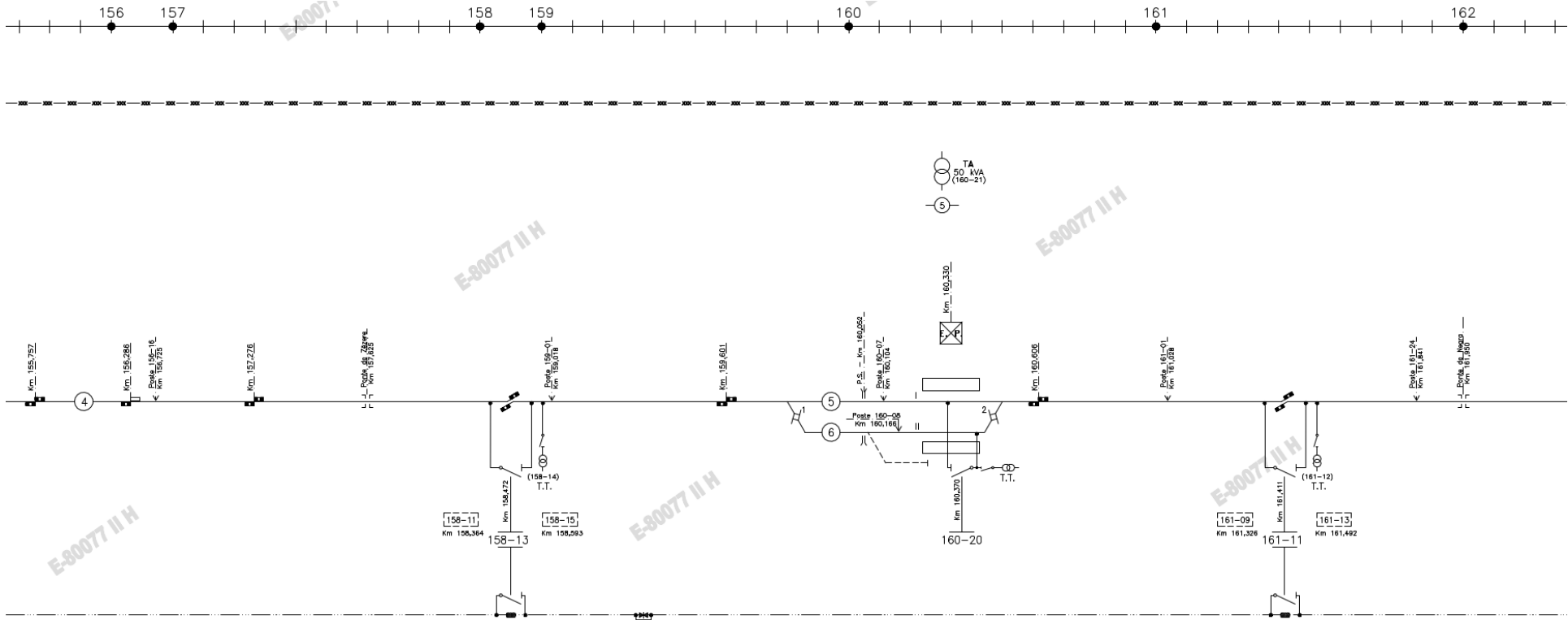




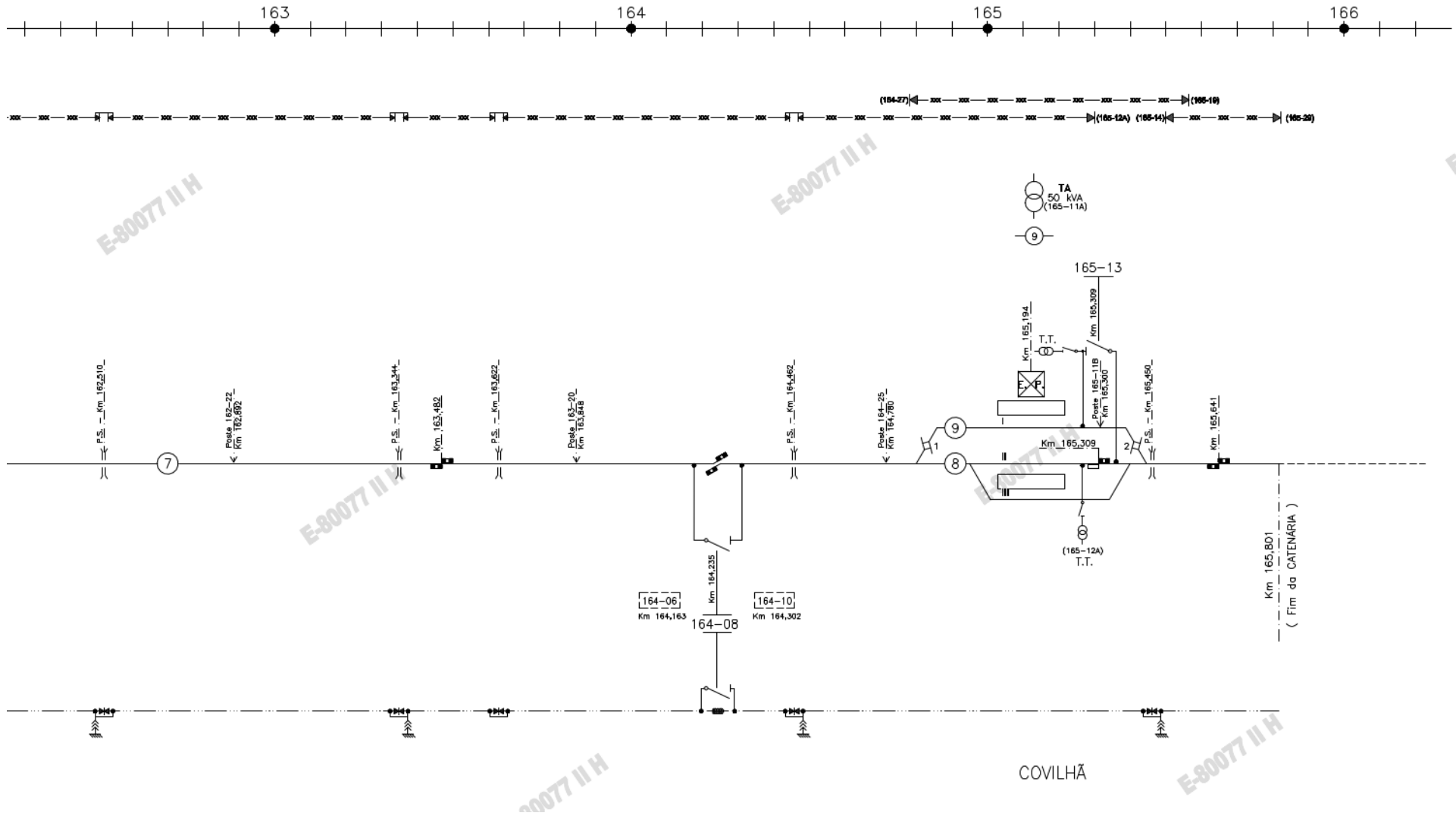








TORTOSENDO



Os quilómetros dos postes limite são indicativos. Devem ser confirmados no terreno.
 Qualquer alteração ao esquema longitudinal, deverá ser comunicado de imediato à
 Catenária e Energia de Tracção.
 Este Esquema Longitudinal entra em vigor a partir de 14/11/2011 após confirmação da
 R.D.C.

SIMBOLOGIA	
	Catenária Principal
	Catenária Secundária
	Via não Electrificada
	Cabo de Terra (C.d.T.) (Aérea)
	Cabo de Terra (C.d.T.) (Subterráneo)
	Cabo de Terra (C.d.T.) (mesmo lado da via)
	Balizagem do C.d.T.
	Ligação eléctrica aérea - enterrado (LEAE)
	Ligação transversal Integral (LTI)
	Isolamento do C.d.T.
	Feeder cabo nu
	Feeder cabo isolado
	Isolamento do Feeder
	Amarração
	Antidesslizamento (C.S.)
	Antidesslizamento (F.C.)
	Secção Elementar
	Poste Limite
	Isolador de Secção simétrico
	Isolador de Secção assimétrico
	Secionamento de Lâmina de Ar
	Zona Comum
	Zona Neutra
	Zona Neutra Secionada
	Amarração fixa
	Amarração compensada FC
	Amarração compensada CS+FC
	Seccionador
	Comando Manual (Cat. Principais)
	Comando Manual (Cat. Secundárias)
	Comando Eléctrico (Do PCT)
	Encravamento mecânico entre aparelhos
	É proibido ter ambos os aparelhos fechados
	Seccionador de terra
	Interruptor
	Disjuntor
	Fideável
	Transformador de Tensão
	Transformador de Alimentação
	Transformador de Intensidade
	Pára-Raios
	Subestação de Tracção (SST)
	Posto de Catenária (SP)
	Posto de Catenária (SSP)
	Posto de Catenária (SS)
	Posto de Catenária (Ramal)
	Posto de Catenária (Barramento-B)
	Posto Auxiliar (PX)
	Posto de Catenária (ZN)-Via Única
	Interruptor extraível

NOTAS : * Seccionadores a telecomandar

Alterações	Designação	Assinatura	Data
H	Alteração do PK da estação da Covilhã	J.Santos	11/11
C	Colocação de Comando Eléctrico Local em Castelo Novo	J.Santos	10/11
F	Entrada ao serviço do Ramal do Fundão	J.Santos	09/11

	Data	Nome
Levantou		
Projectou		
Desenhou	Janeiro 2011	J.Santos
Verificou		



DIRECÇÃO DE ENGENHARIA DA INFRA-ESTRUTURA
 CATENÁRIA E ENERGIA DE TRACÇÃO

LINHA DA BEIRA BAIXA
 Esquema Longitudinal da Linha Electrificada
 Sector ZN DE ALCAINS - SST FATELA - COVILHÃ

DES* N° **E-80077 II**

O Técnico: _____ Data: 26/05/11

VERSÃO PORTAL