



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação



Caracterização das Frequências de Ressonância de Subestações de Tração de 25 kV a 50 Hz

PEDRO ALEXANDRE MENDES OLIVEIRA
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica
Ramo: Energia

Orientadores:

Professor Doutor Paulo José Duarte Landeiro Gambôa
Professor Doutor Miguel Cabral Ferreira Chaves

Júri:

Presidente: Professor Doutor Luís Manuel dos Santos Redondo

Vogais:

Professor Doutor Paulo José Duarte Landeiro Gambôa
Professor Doutor Filipe André De Sousa Figueira Barata

Dezembro de 2020



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação



Caracterização das Frequências de Ressonância de Subestações de Tração de 25 kV a 50 Hz

PEDRO ALEXANDRE MENDES OLIVEIRA
(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica
Ramo: Energia

Orientadores:

Professor Doutor Paulo José Duarte Landeiro Gambôa
Professor Doutor Miguel Cabral Ferreira Chaves

Júri:

Presidente: Professor Doutor Luís Manuel dos Santos Redondo

Vogais:

Professor Doutor Paulo José Duarte Landeiro Gambôa
Professor Doutor Filipe André De Sousa Figueira Barata

Dezembro de 2020

Dissertação realizada sob orientação de:

Paulo José Duarte Landeiro Gambôa

Professor Adjunto da Área Departamental de
Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação

Miguel Cabral Ferreira Chaves

Professor Adjunto da Área Departamental de
Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação

Resumo

A presente dissertação de Mestrado tem como objetivo realizar o estudo teórico e a simulação numérica de uma aplicação para determinação das frequências de ressonância existentes nos troços de via eletrificados da Rede Ferroviária Nacional, bem como proceder ao seu mapeamento para identificar o grau de compatibilidade do teor harmónico gerados pelos conversores eletrónicos de potência de tração do material circulante existente em Portugal.

O trabalho desenvolvido começa por descrever as características da Rede Ferroviária Nacional em matéria de Energia de Tração, bem como descreve o tipo de material circulante escolhido para a avaliação do grau de compatibilidade dos seus conversores eletrónicos de potência de tração.

O estudo teórico para a elaboração da aplicação para a obtenção das frequências de ressonância teve como base a formulação de Carson-Clem e modeliza um troço eletrificado por uma subestação de tração eléctrica através do Modelo de Linhas de Transmissão Multicondutoras. Esta ferramenta obedece igualmente às regras nacionais e europeias em matéria de energia de tração e retorno da corrente de tração.

Por último é adaptado e desenvolvido o modelo em *Matlab/Simulink*, necessário para a simulação numérica das frequências de ressonância do troço eletrificado alvo do presente estudo. A frequência de ressonância é obtida através da injeção de corrente ao longo do troço, com variação de frequência, obtendo assim a impedância de ressonância do troço a estudar.

Após determinadas as frequências de ressonância, serão comparadas com as frequências de operação dos conversores eletrónicos de potência de tração de um tipo de material circulante que opera atualmente na Rede Ferroviária Nacional.

Palavras-Chave: *Frequência de Ressonância, Rede Ferroviária Nacional, Infraestruturas de Portugal, Teor Harmónico, Conversores Eletrónicos de Potência de Tração, Energia de Tração, Retorno da Corrente de Tração, Material Circulante, Injeção de Corrente, Variação de Frequência, Impedância, Subestação, Carson-Clem, Modelo de Linhas de Multicondutoras*

Abstract

This thesis aims to make the theoretical study and numerical simulation of an application to determine the resonant frequencies in the electrified track sections of the National Railway Network of Portugal, as well as to map them to identify the degree of compatibility of the harmonic content generated by rolling stock power electronic traction converters in Portugal.

The work begins by describing the characteristics of the National Railway Network in terms of traction energy, as well describes the rolling stock chosen to assess the compatibility with the power electronic traction converters.

The theoretical study for the elaboration of the application to obtain the resonant frequencies was based on the Carson-Clem formulation and models a section electrified by substation using a Multiconductor Transmission Lines model. This tool also complies with national and european traction energy and traction current return standards.

Finally, the Matlab/Simulink model, adapted for the numerical simulation of the resonant frequencies of the electrified railway section of the present study, is adapted and developed. The resonant frequency is obtained by injecting current along the section, with frequency variation, thus obtaining the line impedance.

After the resonance frequencies are determined, they will be compared with the operating frequencies of the power electronic traction converters that are installed in one specific type of electric rolling stock operating on the National Railway Network.

Keywords: *Resonance Frequency, National Railways, Infraestruturas de Portugal, Harmonic Content, Power Electronic Traction Converters, Traction Energy, Grounding, Rolling Stock, Current Injection, Frequency Variation, Impedance, Substation, Carson-Clem, Multiconductor Transmission Lines*

Agradecimentos

Aos meus pais, Fernando e Conceição por todo o apoio prestado e confiança depositada em mim na realização desta dissertação.

Aos meus orientadores, Paulo Gambôa e Miguel Chaves, pelo interesse demonstrado no tema proposto para a dissertação, a disponibilidade e contributos que foram essenciais para a realização da mesma.

À minha namorada, Ana Martins por todo o companheirismo, apoio e motivação durante a realização da dissertação.

Ao meu irmão André e à Cristina por todo o apoio demonstrado durante este ciclo de mestrado.

Ao Eng.º Paulo Gonçalves, pelo apoio e transmissão de conhecimentos relacionados com a ferrovia.

A todas as Entidades, em especial a EA-ESL e EA-ECE da Infraestruturas de Portugal que autorizaram e disponibilizaram elementos técnicos (dados, parâmetros, resultados e documentos normativos) que permitiram a realização desta Dissertação de Mestrado.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, à Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação e à Comissão Coordenadora do Curso de Licenciatura e Mestrado em Engenharia Eletrotécnica.

Finalmente, agradeço também a todos os meus colegas e professores da Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação por toda a amizade e apoio prestado durante o ciclo de mestrado.

Índice

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XI
SIGLAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	3
2. CARACTERIZAÇÃO DA INFRAESTRUTURA E DO MODELO DE TRANSMISSÃO DE LINHAS MULTICONDUTORAS.....	5
2.1 SISTEMA FERROVIÁRIO PORTUGUÊS.....	5
2.2 COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE TRACÇÃO NA FREQUÊNCIA.....	14
2.3 MODELO MATEMÁTICO DE TRANSMISSÃO DE LINHAS MULTICONDUTORAS	17
2.3.1 Matriz de Impedâncias.....	19
2.3.2 Matriz de Capacitâncias.....	26
2.3.3 Modelo Equivalente da Subestação	28
3. CONTEÚDO HARMÓNICO DO MATERIAL CIRCULANTE.....	31
4. CARACTERIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO	43
4.1 IMPLEMENTAÇÃO.....	48
4.2 MODELOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO	49
4.2.1 Subestação	49
4.2.2 Injeção de Corrente.....	51
4.2.3 Linhas Multicondutoras	52
4.3 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SIMULAÇÃO.....	56
5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	61
5.1 RESULTADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÃO	61
5.2 COMPARAÇÃO COM O CONTEÚDO HARMÓNICO DO MATERIAL CIRCULANTE.....	64
6. CONCLUSÕES.....	67
6.1 CONCLUSÕES GERAIS	67
6.2 DESENVOLVIMENTOS A REALIZAR NO FUTURO	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71
ANEXO A.....	73

ANEXO B.	107
ANEXO C.	111
ANEXO D.	127
ANEXO E.	131
ANEXO F.	137
ANEXO G.	141

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Linhas eletrificadas na RFN e distribuição das SST e ZN. [1].....	5
Figura 2.2 - Sistema de catenária + Retorno da Corrente de Tração. [4]	7
Figura 2.3 - Distância típica para uma SST de CC de 1500 V. [3]	8
Figura 2.4 – IFTE de CC a 1500 V. [3].....	8
Figura 2.5 - Ligação Bifásica. [4]	9
Figura 2.6 - Ligação em “V”. [4]	10
Figura 2.7 - Distância de alimentação de uma SST de 25 kV 50 Hz. [3].....	10
Figura 2.8 - IFTE de 25 kV 50 Hz. [3].....	11
Figura 2.9 - Distância de Alimentação de uma SST de 2x25 kV 50 Hz. [3].....	11
Figura 2.10 – IFTE de 2x25 kV 50 Hz. [3]	12
Figura 2.11 – Impedância do pantógrafo vs. Localização do comboio vs. Frequência. [9].....	16
Figura 2.12 – Ilustração do cálculo das indutâncias por unidade de comprimento utilizando o método das imagens. [17].....	22
Figura 2.13 – Modelo equivalente do circuito de retorno.	24
Figura 2.14 - Plano transversal da disposição dos condutores.	25
Figura 2.15 - Cálculo de distâncias pelo método das imagens.....	27
Figura 2.16 - Tipologia de um sistema de alimentação ferroviária. [20]	28
Figura 2.17 - Modelo equivalente do transformador da Subestação de Tração.	29
Figura 3.1 - Constituintes tipo de material circulante elétrico. [20].....	31
Figura 3.2 - Unidade Tripla Elétrica (UTE) série 2240 - Configuração em unidade simples. (Figura do autor Raul Marques).....	32
Figura 3.3- Cadeia de medida para obtenção de conteúdo harmónico dos conversores de tração. [2]	34
Figura 3.4 - Cassete de fita magnética de armazenamento dos dados de ensaio.....	35
Figura 3.5 - Gravador Sony PCA208Ax.	35
Figura 3.6 – NI-DAQ 6259.	36
Figura 3.7 – Disposição geral dos equipamentos.	37
Figura 3.8 -Excerto do <i>Front Panel</i> da aplicação LabVIEW desenvolvida.....	37
Figura 3.9 – Excerto do <i>Block Diagram</i> da aplicação LabVIEW desenvolvida.	38
Figura 3.10 - Conteúdo harmónico de uma unidade simples UTE.	39
Figura 3.11 - Conteúdo harmónico produzido pelo entrelaçamento de três conversores.....	39
Figura 3.12 - Espectro harmónico da corrente numa unidade motora CP 2240.....	40

Figura 3.13- Espectro harmónico da tensão medida na catenária.	41
Figura 4.1 - Layout esquemático do troço alimentado pela SST de Quinta Grande.	48
Figura 4.2 – Modelo do troço alimentado pela SST de Quinta Grande.	48
Figura 4.3 - Modelo da Subestação (Quinta Grande).....	49
Figura 4.4 - Características do Transformador Linear.	50
Figura 4.5 - Modelo de injeção de corrente.....	51
Figura 4.6 - Excerto de um troço MTL do modelo criado.	52
Figura 4.7 - Bloco MTL.	53
Figura 4.8 - Parâmetros da matriz de indutâncias próprias e mútuas.	54
Figura 4.9 - Bloco LEAE.	54
Figura 4.10 - Bloco LTI.	55
Figura 4.11 – Bloco representativo do modelo de um comboio.....	56
Figura 4.12 - Mensagem de Simulação.	56
Figura 4.13 – Inputs Transformador da SST.	57
Figura 4.14 – Inputs do comboio e ramais de entrega de energia.	58
Figura 5.1 - Comportamento na frequência da impedância vista pelo pantógrafo no troço alimentado pela Subestação de Tração de Quinta Grande.	61
Figura 5.2 - Comportamento na frequência da impedância de vista pelo pantógrafo na ZN de Muge, SST de Quinta Grande e ZN de Canha.....	62
Figura 5.3 - Distribuição do Material Circulante	63
Figura 5.4 – Afetação das frequências de ressonância com UTE em serviço na zona da SST de Quinta Grande.	63
Figura 5.5 - Espectro da tensão medido.	64
Figura 5.6 - Espectro da corrente medido na unidade motora 1.....	65
Figura 5.7 - Espectro da corrente medido na unidade motora 2.....	65

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Comparação entre sistemas de alimentação na RFN. [3]	12
Tabela 2.2 – Comparação entre sistemas de eletrificação na RFN. [3].....	12
Tabela 2.3 - Localização das SST AC da RFN. [8]	13
Tabela 2.4 - Localização das SST CC da RFN. [8].....	14
Tabela 2.5 - Parâmetros do Transformador.....	29
Tabela 3.1 - Características Elétricas da UTE de Silício da série 2240. [22].....	33
Tabela 3.2- Características espectrais dos conversores de tração das UTE de SI.	40
Tabela 4.1 - Parâmetros dos Condutores Ativos e de Retorno.....	43
Tabela 4.2 - Características AC Voltage Source e Ramal de Fornecimento de Energia.....	49
Tabela 4.3 - Valores dos parâmetros do Transformador Linear.....	50
Tabela 4.4 - Características do modelo de injeção de corrente.	51
Tabela 4.5 - Parâmetros do MTL.	53
Tabela 5.1 - Caracterização das frequências de ressonância.	62
Tabela 5.2 - Conteúdo harmônico dos conversores de tração das UTE de SI da série 2240.	66
Tabela 6.1 - Resumo geral dos resultados obtidos para as frequências de ressonância	67

Siglas

AC	-	Corrente Alternada
AT	-	Alta Tensão
ATT	-	Autotransformador
CC	-	Corrente Contínua
CDTA	-	Cabo de Terra Aéreo
CDTE	-	Cabo de Terra Enterrado
CEM	-	Compatibilidade Eletromagnética
CP	-	Comboios de Portugal
DAQ	-	<i>Data Acquisition</i>
EDP	-	Energias de Portugal
EN	-	<i>European Norm</i>
FFT	-	<i>Fast Fourier Transform</i>
GTO	-	<i>Gate turn-off thyristor</i>
IFTE	-	Instalações Fixas de Tração Elétrica
IGBT	-	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IP	-	Infraestruturas de Portugal, S.A.
LEAE	-	Ligação Equipotencial entre cabo de terra Aéreo e cabo de terra Enterrado
LTI	-	Ligação Transversal Integral
MC	-	Material Circulante
MT	-	Média Tensão
MTL	-	<i>Multi-Transmission Line</i>
NI	-	<i>National Instruments</i>
PK	-	Ponto Quilométrico
REFER	-	Rede Ferroviária Nacional, EP
REN	-	Redes Energéticas Nacionais
RFN	-	Rede Ferroviária Nacional
SI	-	Silício
SST	-	Subestação de Tração
UTE	-	Unidade Tripla Elétrica
ZN	-	Zona Neutra

Lista de Símbolos

A	- Corrente elétrica (ampere)
A_i	- Área do condutor [m^2]
c	- Capacidade da linha de contacto em p.u.
$[C]$	- Matriz das Capacitâncias [F]
C_{11}	- Capacidade interna do condutor 1 [F]
C_{33}	- Capacidade interna do condutor 3 [F]
C_{44}	- Capacidade interna do condutor 4 [F]
C_{55}	- Capacidade interna do condutor 5 [F]
C_{13}	- Capacidade mútua entre o condutor 1 e o condutor 3 [F]
C_{14}	- Capacidade mútua entre o condutor 1 e o condutor 4 [F]
C_{15}	- Capacidade mútua entre o condutor 1 e o condutor 5 [F]
C_{34}	- Capacidade mútua entre o condutor 3 e o condutor 4 [F]
C_{35}	- Capacidade mútua entre o condutor 3 e o condutor 5 [F]
C_{45}	- Capacidade mútua entre o condutor 4 e o condutor 5 [F]
D_e	- Diâmetro do condutor cilíndrico imaginário onde circula a corrente pela terra [m]
d_{ij}	- Distância entre um condutor indutor e induzido [m]
D_{ij}	- Distância entre um condutor i e um condutor j , relativamente a um plano de referência [m]
F	- Capacidade elétrica (farad)
f	- Frequência [Hz]
G	- Matriz das Condutâncias [S]
H	- Indutância (henry)
Hz	- Frequência (hertz)
I	- Vetor das correntes dos condutores [A]
i	- Corrente [A]
$I(L)$	- Corrente do extremo mais distante da SST [A]
$I(O)$	- Corrente do extremo mais próximo da SST [A]
L_{max}	- Comprimento total do troço [m]

l	- Indutância da linha de contacto em p.u.
$[L]$	- Matriz das Indutâncias [H]
$[L^{-1}]$	- Matriz Inversa das Indutâncias [H]
L_i	- Indutância do condutor i [H]
$Latm$	- Indutância de Magnetização do transformador da SST [H]
Lh_{tr}	- Indutância do enrolamento primário do transformador da SST [H]
$Lint_1$	- Indutância interna do condutor 1 [H]
$Lint_2$	- Indutância interna do condutor 2 [H]
$Lint_3$	- Indutância interna do condutor 3 [H]
$Lint_4$	- Indutância interna do condutor 4 [H]
$Lint_5$	- Indutância interna do condutor 5 [H]
Ll_{tr}	- Indutância do enrolamento secundário do transformador da SST [H]
L_{REN}	- Indutância da linha de entrega da REN [H]
Pn_{transf}	- Potência nominal do transformador da SST [VA]
r	- Resistência de linha de contacto em p.u.
$[R]$	- Matriz das Resistências [Ω]
r_i	- Raio do condutor [m]
$Ratm$	- Resistência de magnetização do transformador da SST [Ω]
$Rcdte$	- Resistência do CDTE [$\Omega.m^{-1}$]
$Rearth/Re$	- Resistência da terra [$\Omega.km^{-1}$]
Rh_{tr}	- Resistência do enrolamento primário do transformador da SST [Ω]
Rl_{tr}	- Resistência do enrolamento secundário do transformador da SST [Ω]
R_{Ren}	- Resistência da linha de entrega da REN [Ω]
V	- Tensão (volt)
$[V]$	- Vetor de tensões de N condutores em relação a um condutor de referência [V]
VA	- Potência aparente (volt-ampere)
$Vat1_{peak}$	- Tensão de pico do lado primário do transformador da SST [V]
$Vbase_{prim}$	- Tensão eficaz do lado primário do transformador da SST [V]
$Vbase_{sec}$	- Tensão eficaz do lado secundário do transformador da SST [V]
$V(L)$	- Tensão do extremo mais distante da SST [V]

$V(O)$	- Tensão do extremo mais próximo da SST [V]
W	- Potência (watt)
x	- Comprimento intermédio de uma secção [m]
$[Y]$	- Matriz das admitâncias [S]
$[Z]$	- Matriz das impedâncias [Ω]
Z_c	- Impedância característica da linha [Ω]
$[Z_{ext}]$	- Matriz das impedâncias externas dos condutores [Ω]
$[Z_g]$	- Matriz das impedâncias geométricas dos condutores [Ω]
$[Z_{int}]$	- Matriz das impedâncias internas dos condutores [Ω]
$[Z_{int}]_i$	- Matriz das impedâncias internas do condutor i [Ω]
$[Z_t]$	- Matriz das impedâncias de terra [Ω]
$[Z_p]$	- Impedância vista pelo pantógrafo [Ω]
σ	- Condutividade Elétrica [S/m]
δ	Efeito Pelicular (<i>Skin depth</i>) [m]
ϵ_0	- Permissividade elétrica do vácuo [Fm^{-1}]
ρ	- Resistividade do solo [$\Omega.m$]
μ_0	- Permeabilidade magnética do vácuo [H/m]
μ	- Permeabilidade magnética relativa
γ	- Constante de propagação da linha
Ω	- Resistência elétrica (ohm)
ω	- Velocidade angular [rad/s]

1. Introdução

1.1 Enquadramento

Com a modernização das linhas ferroviárias da Rede Ferroviária Nacional (RFN) e as diretrizes europeias de interoperabilidade entre estados da comunidade europeia por forma a viabilizar um transporte ferroviário de pessoas e mercadorias eficientemente, potenciando a deslocação de pessoas e a competitividade comercial europeia, torna-se necessário proceder à caracterização de cada troço de linha ferroviária por parte do seu gestor de infraestruturas.

Grande parte das linhas ferroviárias encontram-se atualmente eletrificadas, um meio de transporte de energia que permite um maior rendimento no que toca ao transporte de pessoas e mercadorias, comparativamente a linhas não eletrificadas. Como tal, a circulação em linhas eletrificadas permite a circulação de comboios elétricos munidos com as respetivas cadeias de tração utilizando essencialmente eletrónica de potência. As vantagens da utilização da eletrónica de potência são numerosas, não obstante existem alguns aspetos a tomar em devida consideração, nomeadamente em matéria de conteúdo harmónico nas correntes gerado pelos conversores de tração.

Estes conversores de tração possuem uma determinada frequência de operação associada ao tipo de semicondutores presentes nestes. Com o passar dos anos os semicondutores utilizados nos conversores de tração foram igualmente evoluindo, permitindo novas frequências de operação, as quais necessitam de ser avaliadas com as frequências de ressonância elétrica de um determinado troço ferroviário eletrificado.

Torna-se então imprescindível a caracterização dos vários troços ferroviários eletrificados para que seja possível avaliar a compatibilidade de operação de determinado comboio que recorra a um tipo de conversor de tração com as frequências de ressonância elétrica destes troços eletrificados.

Uma ressonância elétrica ocorre quando a parte indutiva de um circuito elétrico é igual à parte capacitiva e esta pode ser definida de duas formas, nomeadamente em ressonância elétrica série ou paralelo. Para circuitos elétricos série, o fenómeno de ressonância ocorre quando a impedância é mínima, enquanto que para circuitos elétricos em paralelo, esta ressonância ocorre quando a impedância do circuito é máxima. Um sistema de alimentação ferroviário é caracterizado por ser um circuito elétrico em paralelo, onde as propriedades resistivas, indutivas e capacitivas dos condutores constituintes do sistema têm de ser tomadas em devida consideração. Estas ressonâncias levam ao

aparecimento de harmónicas características do circuito de alimentação ferroviário. As frequências associadas à ressonância série e paralelo deverão ser diferentes de outras frequências, tais como as frequências e as respetivas harmónicas resultantes do funcionamento dos conversores de tração do material circulante, uma vez que poderão provocar oscilações significativas na tensão resultado da excitação das ressonâncias do sistema. Deste modo, a existência destas ressonâncias poderão criar problemas tais como tensão elevada na catenária, sobreaquecimento do fio de contacto em determinados pontos da catenária, interferências em linhas de comunicação dos sistemas de comando e controlo ferroviário, sobreaquecimento dos equipamentos, vibrações nos condensadores de potência, falhas no funcionamento nos dispositivos de proteção e falhas nos conversores de tração do material circulante.

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo fazer o estudo teórico e simulação numérica das frequências de ressonância de subestações da RFN. Essa caracterização tem por objetivo identificar o grau de compatibilidade do teor harmónico das correntes gerado pelos conversores de tração do material circulante com as linhas alimentadas por essas subestações.

O troço ferroviário alvo do presente estudo será o troço compreendido entre Muge e Canha, alimentados pela Subestação de Quinta Grande na Linha de Vendas Novas [1].

A primeira fase da presente dissertação tem como objetivo realizar uma análise detalhada do sistema ferroviário nacional em matéria elétrica. Serão descritos os elementos constituintes de um sistema de energia de tração bem como as diferentes tipologias de entrega de energia a uma catenária. Ainda nesta fase será realizado um estudo teórico do modelo matemático existente que servirá como base para a realização do presente objetivo, bem como referir o modelo que será utilizado para determinar as impedâncias da infraestrutura vista pelo material circulante.

A segunda fase consiste apenas na apresentação das frequências de operação dos conversores de tração do material circulante elétrico, nomeadamente das Unidades Triplas Elétricas (UTE) da série 2240 [2]. Estas frequências de operação foram retiradas de gravações propriedade da Infraestruturas de Portugal (IP), pelo que esta fase apenas possui um carácter descritivo que será utilizado posteriormente para avaliação da compatibilidade com a frequência de ressonância da subestação alvo do estudo.

Nas fases seguintes serão realizados os modelos matemáticos apresentados nos capítulos seguintes necessários para a modelização do troço ferroviário em estudo, tomando em consideração as condições reais que se podem encontrar na linha, e realizadas as análises da infraestrutura onde se irá avaliar a impedância desta vista apenas por uma unidade motora ao longo da catenária. Assim sendo, as simulações serão efetuadas recorrendo ao *software Matlab/Simulink*.

Por fim serão apresentadas as conclusões do trabalho, onde será efetuada a análise aos resultados obtidos, terminando com sugestões para os trabalhos a realizar no futuro com base no presente estudo.

1.3 Organização e Estrutura do Documento

O presente documento, destinado a indicar o trabalho realizado na dissertação encontra-se dividido em 6 capítulos principais, referências bibliográficas e anexos.

O primeiro capítulo diz respeito à introdução do tema alvo de estudo e o motivo pelo qual o tema abordado merece destaque, os objetivos do presente estudo e a estrutura do documento escrito.

O segundo capítulo apresenta o estado da arte, onde é descrita a infraestrutura ferroviária Portuguesa e o modelo matemático desenvolvido em *Matlab/Simulink* que servirá de base para a elaboração da simulação numérica destinada à obtenção das frequências de ressonância.

No terceiro capítulo são apresentadas as frequências de operação dos conversores de tração conhecidas da UTE 2240 em operação em Portugal. Estas frequências foram obtidas por parte da IP, as quais foram gentilmente fornecidas para o âmbito do presente estudo.

No quarto capítulo é apresentado o modelo de simulação numérica final, adaptado para o propósito da presente dissertação. Serão apresentados os detalhes necessários para descrever o funcionamento do modelo matemático, bem como para descrever o funcionamento da simulação numérica a efetuar.

O quinto capítulo diz respeito à apresentação de resultados e à interpretação destes.

Por último, no sexto capítulo serão apresentadas as conclusões gerais da presente dissertação, bem como potenciais trabalhos futuros que o tema estudado na presente dissertação possa desencadear.

2. Caracterização da Infraestrutura e do Modelo de Transmissão de Linhas Multicondutoras

2.1 Sistema Ferroviário Português

A Rede Ferroviária Nacional (RFN), representada na Figura 2.1, apresenta troços eletrificados a 1500 VCC, troços eletrificados a 25 kV a 50 Hz (AC) e ainda troços que não estão eletrificados, sendo aqui utilizada a tração diesel.

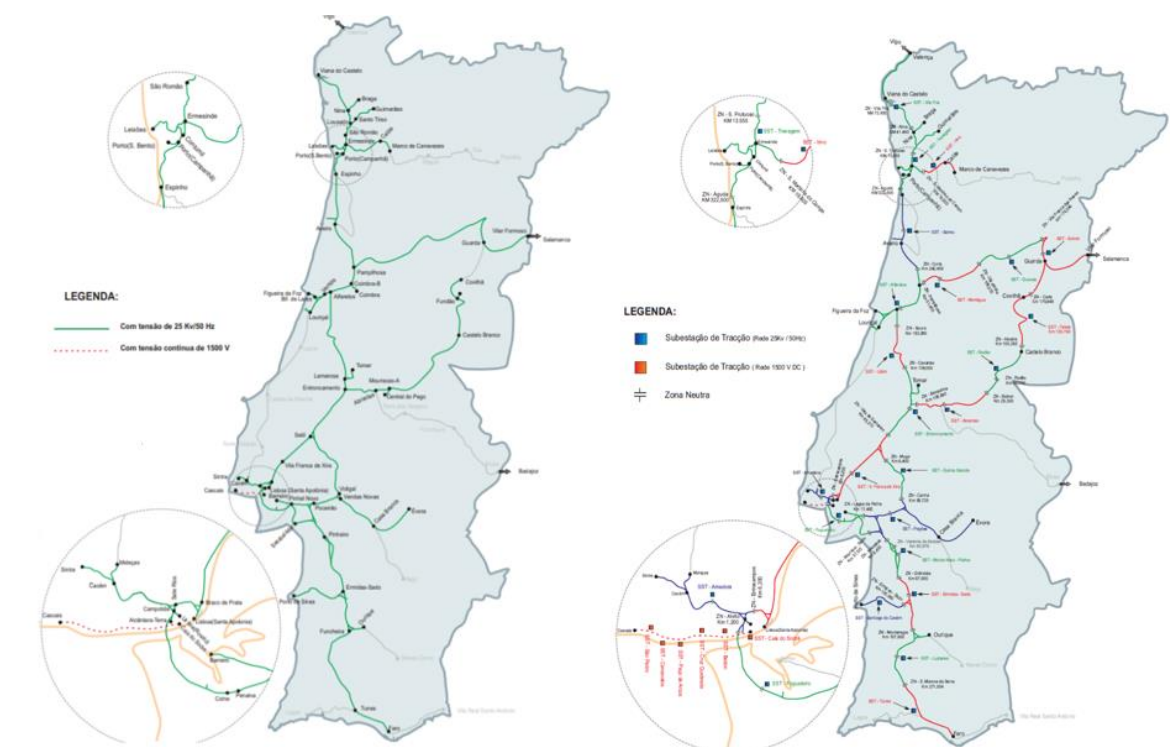


Figura 2.1 - Linhas eletrificadas na RFN e distribuição das SST e ZN. [1]

O sistema de alimentação de energia do sistema ferroviário é caracterizado por instalações fixas as quais permitem a tração elétrica ao material circulante elétrico que irá circular nessas instalações.

Estas Instalações Fixas para Tração Elétrica (IFTE) são caracterizadas por três subsistemas [3]:

- Instalações de Catenária;
- Energia de Tração;
- Retorno de Corrente de Tração.

As IFTE, tal como o próprio nome indica, são um conjunto de instalações necessárias para fornecer energia elétrica ao material circulante.

A Energia de Tração é o sistema que nos permite controlar e alterar as grandezas elétricas, ou seja, a forma como o transporte de energia é realizado. A Catenária é o meio responsável para realizar o transporte de energia num troço compreendido entre subestações de tração e os comboios. O Retorno de Corrente de Tração é o meio necessário para que as correntes consumidas pelos comboios retornem em segurança à tomada de retorno da subestação respetiva.

Ainda relativamente à Energia de Tração, esta é caracterizada por instalações com grandes componentes na área da eletrotécnica, materializada em instalações tipo Subestações ou Postos de Catenária, bem como em aspetos elétricos relacionados com o transporte de energia, nomeadamente a qualidade com que é realizado o fornecimento de energia.

O sistema de Catenária é composto por condutores ativos e por condutores do sistema de retorno. Os condutores ativos são compostos por:

- Fio de Contacto;
- Cabo de Suporte;
- Pêndulos;
- *Feeder* Negativo.

Os condutores do sistema de retorno responsáveis pelo transporte da corrente até a Subestação de tração (SST):

- Carris;
- Cabo de Terra Enterrado (CDTE);
- Cabo de Terra Aéreo (CDTA);
- Terra.

Na Figura 2.2 é apresentada uma imagem representativa dos condutores do sistema da catenária e do sistema de retorno de correntes de tração.

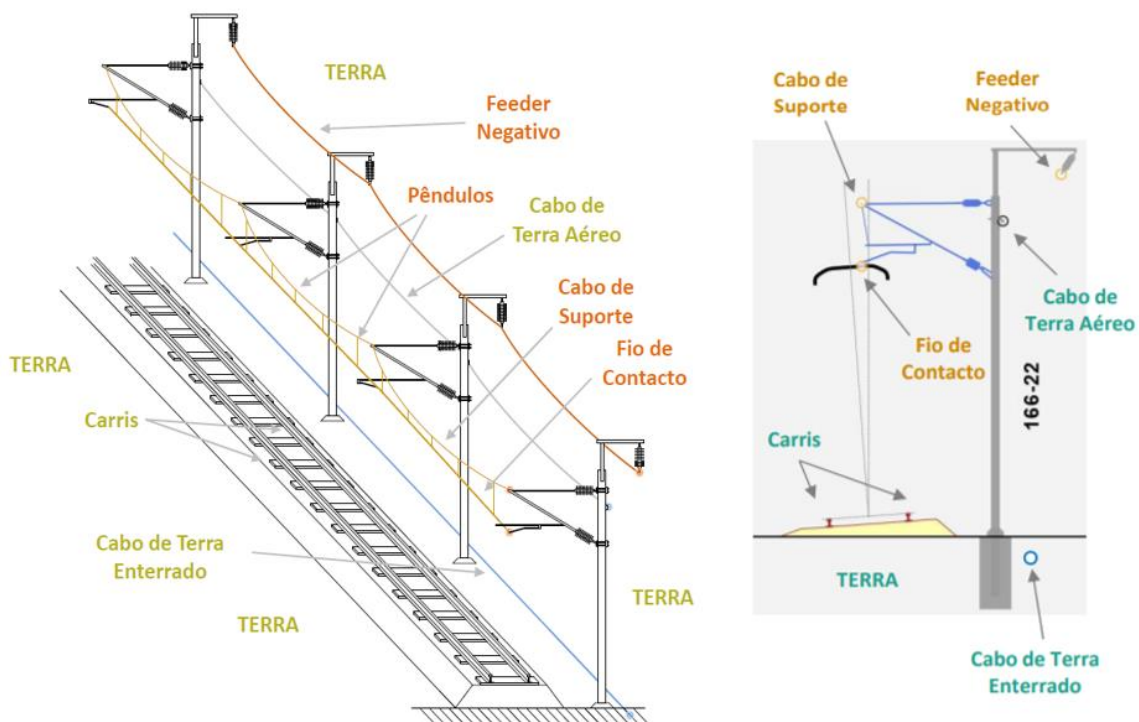


Figura 2.2 - Sistema de catenária + Retorno da Corrente de Tração. [4]

Existem dois tipos de Subestações (SST) na RFN. Essas SST podem dividir-se em dois conjuntos:

- 1) Subestações de Tração de Corrente Contínua;
- 2) Subestações de Tração de Corrente Alternada.

As SST de corrente contínua são alimentadas a partir da rede pública, geralmente em MT e em AC, sendo que a transformação da alimentação é realizada em grupos de transformadores trifásicos e retificadores AC/DC. Estes retificadores podem ser materializados com díodos (mais económico, de comutação natural e apenas fluxo num sentido) ou através de IGBT's, que materializa uma solução mais dispendiosa, de controlo complexo, mas que permite o fluxo de energia nos dois sentidos.

Estas subestações de tração estão ligadas a uma instalação de catenária que funciona com uma tensão de 1500 V ou 3000 V. A distância entre subestações é geralmente curta, entre 4 a 6 km para catenárias a 1500 V. Como se trata de uma instalação de corrente contínua não existe a necessidade de criar uma zona neutra, pois as SST são exploradas em paralelo.

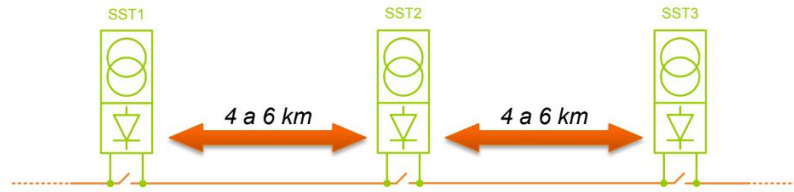


Figura 2.3 - Distância típica para uma SST de CC de 1500 V. [3]

O aproveitamento de energia em instalações deste tipo de tração é muito reduzido. Apenas é possível o reaproveitamento da travagem regenerativa por um comboio que se encontre no mesmo sector que o comboio que se encontra a realizar travagem regenerativa (conforme exemplificado na Figura 2.4). Na solução mais económica, a utilização de díodos para a retificação da corrente alternada para corrente contínua não permite o fluxo de energia para a rede de distribuição.

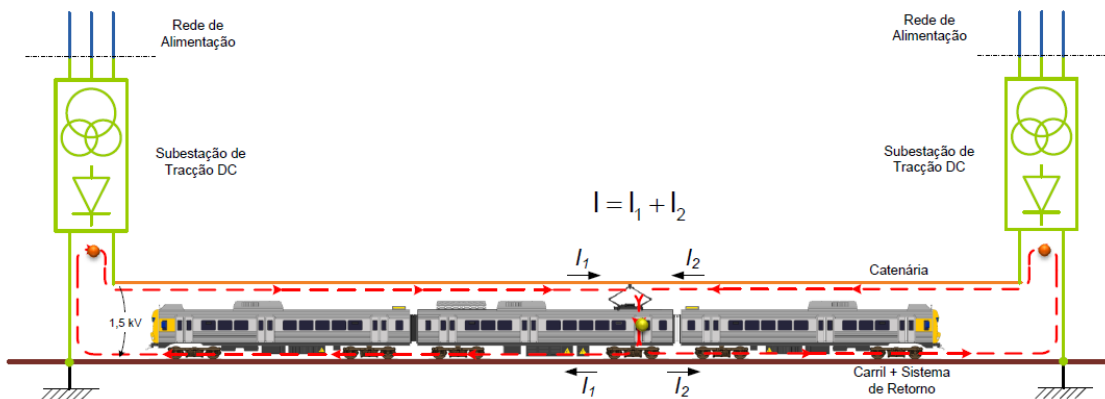


Figura 2.4 – IFTE de CC a 1500 V. [3]

As SST de corrente alternada (AC) materializam a evolução dos sistemas de eletrificação. Estes sistemas de eletrificação permitem regular a tensão da catenária a bordo do material circulante para a aplicação nos seus motores e como é utilizada a frequência da rede, não obriga a utilização de conversores adicionais na SST de tração.

Estas SST são igualmente alimentadas pela rede pública em AT ou MT e os sistemas de energia mais comuns são:

- 25 kV a 50 Hz;
- 2x25 kV a 50 Hz (Com Autotransformadores);

Os transformadores de potência presentes nestas subestações são bifásicos, isto é, das três fases provenientes da rede pública (ligadas ao primário deste transformador), apenas 2 (ligadas ao secundário) serão utilizadas pelo transformador de tração para ligação à catenária.

Existem duas tipologias de ligação do transformador da SST à catenária, nomeadamente:

- Ligação Bifásica;
- Ligação em “V”.

Em SST com ligação à catenária, existem normalmente dois transformadores de potência alimentados pelas mesmas duas fases, em que um funciona em carga e outro em reserva [5]. Nestas SST apenas são recebidas do lado primário do transformador duas fases, sendo que do lado secundário também são utilizadas duas fases (transformador bifásico), para ligação à catenária e aos carris.

Em SST com ligação à catenária com tipologia em “V”, existem 3 transformadores de potência, em que dois encontram-se ao serviço e um terceiro fica em reserva [5]. Na ligação em “V” cada transformador é alimentado por duas fases, sendo uma comum aos dois transformadores em serviço. Cada um alimenta metade do troço alimentado pela SST em questão, sendo necessário existir uma zona neutra entre cada setor. O desfasamento entre as tensões de cada setor é de 60° , equivalente a uma diferença de potencial de 25 kV entre as fases que ligam à catenária.

A ligação em “V” permite menores interferências na rede de energia elétrica a montante da subestação de tração e permite uma melhor distribuição dos consumos pelo sistema de alimentação ferroviário [6], comparativamente ao sistema bifásico.

Na Figura 2.5 e Figura 2.6 são apresentados dois esquemas de duas SST, cuja tipologia de ligação à catenária são respetivamente a ligação bifásica e ligação em “V”, onde 0, 4 e 8 correspondem às fases da linha trifásica da rede de distribuição de energia elétrica.

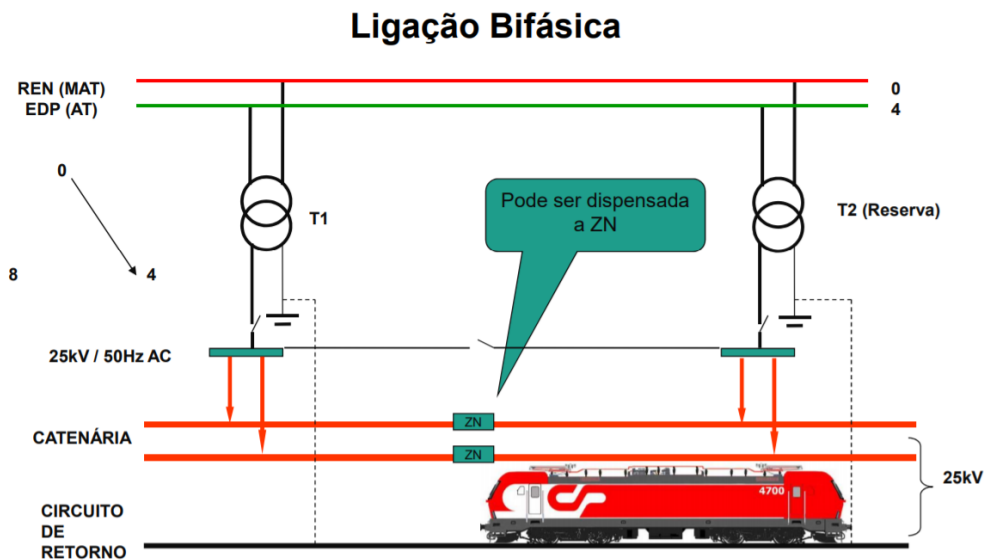


Figura 2.5 - Ligação Bifásica. [4]

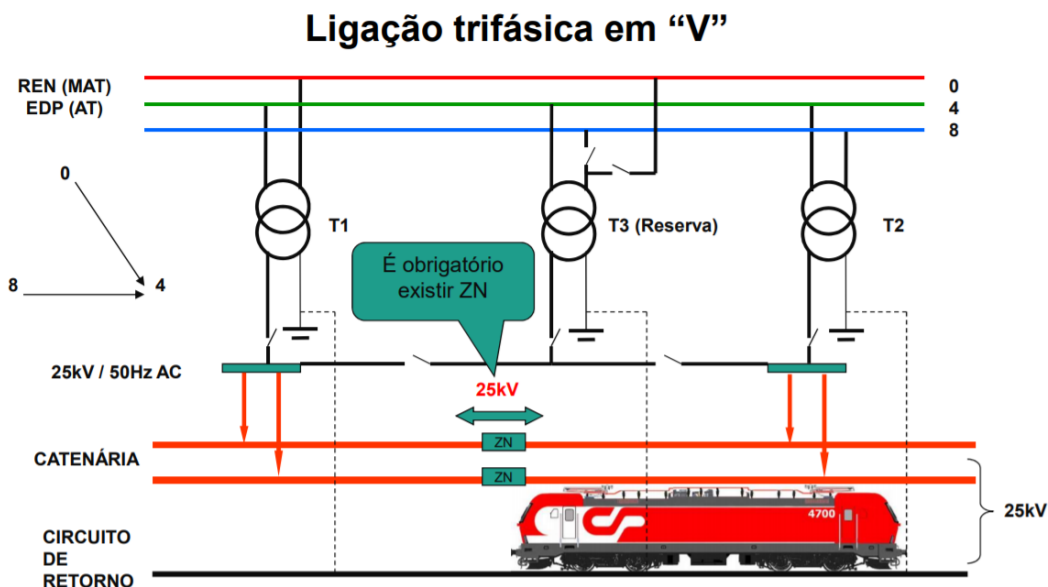


Figura 2.6 - Ligação em “V”. [4]

As Subestações de 25 kV a 50 Hz conseguem alimentar um troço com uma extensão compreendido entre 50 a 70 km e as subestações de 2x25 kV a 50 Hz (com autotransformadores) conseguem alimentar troços compreendidos entre 60 a 100 km. Os autotransformadores têm um ponto médio que permite a ligação dos carris (terra) à catenária e ao *feeder* negativo.

Deste modo, as SST de corrente AC necessitam então de uma zona neutra (zona sem tensão, onde o comboio apenas se desloca apenas pela inércia deste), para que as fases provenientes das diferentes subestações não se misturem, evitando assim um desarme da alimentação de energia, o que poderia resultar numa penalização ao movimento do comboio, pois este ficaria sem tensão, necessária para o funcionamento dos seus motores.

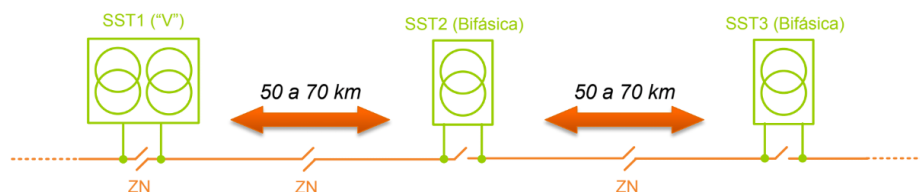


Figura 2.7 - Distância de alimentação de uma SST de 25 kV 50 Hz. [3]

O aproveitamento de energia nestas instalações é quase total, isto é, existe o consumo por parte do material circulante e existe igualmente no sentido inverso, a devolução de energia à rede (frenagem regenerativa) caso seja cumprido o disposto na norma EN 50163 [7].

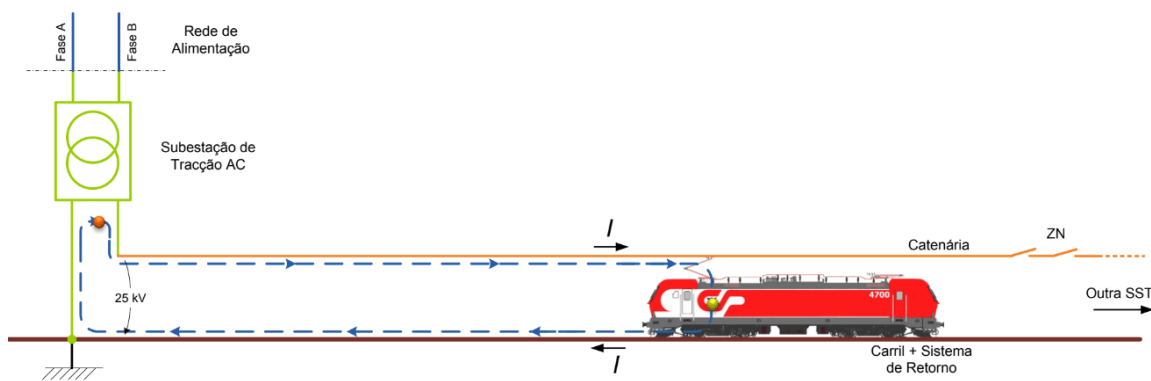


Figura 2.8 - IFTE de 25 kV 50 Hz. [3]

Existem, no entanto, particularidades no sistema de alimentação de 2x25 kV a 50 Hz, exemplificado na Figura 2.10, os quais serão descritos de seguida:

- Existe um condutor adicional instalado ao longo da linha, denominado “*feeder negativo*”. Este *feeder* tem uma amplitude de tensão em relação à terra igual à tensão entre catenária-terra, ou seja, 25 kV mas em oposição de fase, o que resulta em -25 kV. Deste modo, a tensão entre Catenária-Feeder será de 50 kV a 50 Hz;
- Existem autotransformadores (At) instalados ao longo de um troço. Estes At encontram-se dispostos geralmente a cada 10 km e a sua principal função é realizar a ligação elétrica entre a catenária, *feeder* negativo e o sistema de retorno de tração, conforme apresentado na Figura 2.9 e Figura 2.10;

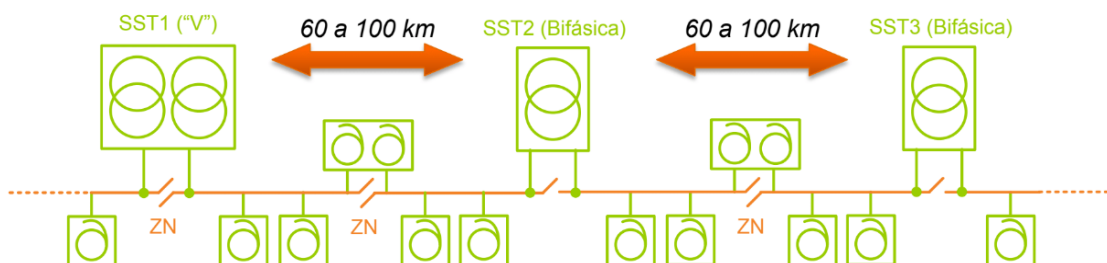


Figura 2.9 - Distância de Alimentação de uma SST de 2x25 kV 50 Hz. [3]

- Como a tensão é superior ao sistema de 25 kV, a capacidade de transporte de energia é superior, pois as perdas são inferiores;
- A corrente de retorno circula principalmente pelo *feeder* negativo, à exceção do troço compreendido entre dois At's onde circula um comboio;
- Neste sistema, a corrente que circula no sistema de retorno e catenária são menores.

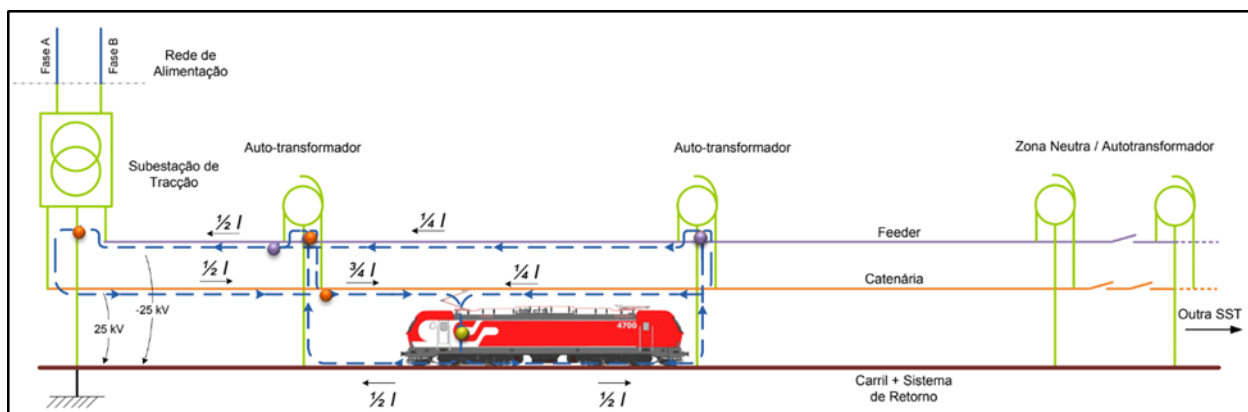


Figura 2.10 – IFTE de 2x25 kV 50 Hz. [3]

De seguida é apresentada a Tabela 2.1 onde é ilustrada a comparação dos valores de tensão característicos em instalações CC e AC:

Tabela 2.1 – Comparação entre sistemas de alimentação na RFN. [3]

Sistema	Tensão mínima não permanente U_{min2} [V]	Tensão mínima permanente U_{min1} [V]	Tensão Nominal U_n [V]	Tensão máxima permanente U_{max1} [V]	Tensão máxima não permanente U_{max2} [V]
CC (valor médio)	1000	1000	1500	1800	1950
AC (Valor eficaz ou RMS)	17500	19000	25000	27500	29000

Ainda relativamente às IFTE presentes na RFN existem as seguintes características das instalações de catenária presentes em Portugal de acordo com a Tabela 2.2:

Tabela 2.2 – Comparação entre sistemas de eletrificação na RFN. [3]

Sistemas Elétricos de Tração			
	1500 V DC	25 kV, 50 Hz	2x25 kV, 50 Hz
Linha	Cascais	Rede Geral	Beira Alta e Beira Baixa
1ª Eletrificação	1926	1957	1996
Extensão de Catenária	69 km	2416 km	294 km
% de eletrificação	2,5%	86,8%	10,7%

A localização e as principais características das subestações de tração de corrente alternada são aquelas que se apresentam na Tabela 2.3 [8]:

Tabela 2.3 - Localização das SST AC da RFN. [8]

Linha	Subestação	Primário			Transformadores				Potência de Curto Circuito Fase-Fase Primário SST [MVA]		Catenária
		Sistema	Nível de Tensão [kV]	Tipo de Ligação	Nº Trfs	Potência Nominal por Trf. [MVA]	Tensão de Curto-Circuito [%]	Potência em Serviço [MVA]	Mínima	Máxima	Sistema
Sintra	Amadora	Bifásica	63	Bifásica	3	16	11,70	32	825	914	25kV 50Hz
Norte	V.F. Xira	Trifásica	63	"V"	3	16	8,48	32	536	580	25kV 50Hz
	Entroncamento	Trifásica	63	"V"	3	10	9,50	20	176	183	25kV 50Hz
	Litém	Bifásica	63	Bifásica	2	10	8,30	10	378	548	25kV 50Hz
	Alfarelos	Trifásica	63	"V"	3	16	9,03	32	365	750	25kV 50Hz
	Salreu	Trifásica	63	"V"	3	16	9,03	32	819	1191	25kV 50Hz
Minho	Travagem	Trifásica	63	"V"	3	16	9,03	32	977	1707	25kV 50Hz
	Vila Fria	Bifásica	150	Bifásica	2	20	7,00	20	1507	1689	2x25kV 50Hz
Douro	Irivo	Bifásica	220	Bifásica	2	20	9,23	20	2618	3234	25kV 50Hz
Beira Alta	Mortágua	Bifásica	220	Bifásica	2	16,2	7,28	16,2	1408	1826	2x25kV 50Hz
	Gouveia	Bifásica	220	Bifásica	2	16,2	7,28	16,2	1584	1892	2x25kV 50Hz
	Sobral	Bifásica	220	Bifásica	2	16,2	7,28	16,2	1496	1782	2x25kV 50Hz
Beira Baixa	Abrantes	Bifásica	63	Bifásica	2	10	8,72	10	239	259	25kV 50Hz
	Rodão	Bifásica	150	Bifásica	2	16,2	7,00	16,2	1005	1170	25kV 50Hz
	Fatela	Bifásica	220	Bifásica	2	20	7,00	20	2140	2320	2x25kV 50Hz
Vendas Novas	Quinta Grande	Bifásica	150	Bifásica	2	16,2	9,30	16,2	420	450	25kV 50Hz
Alentejo	Pegões	Trifásica	150	Bifásica	2	16,2	9,30	16,2	840	930	25kV 50Hz
Sul	Fogueteiro	Bifásica	150	Bifásica	2	20	9,18	20	1590	1980	25kV 50Hz
	Monte Novo	Bifásica	150	Bifásica	2	12	6,69	12	840	975	25kV 50Hz
	Ermidas Do Sado	Bifásica	150	Bifásica	2	12	6,60	12	1065	1215	25kV 50Hz
	Luzianes	Bifásica	150	Bifásica	2	12	7,00	12	540	630	25kV 50Hz
	Tunes	Bifásica	63	Bifásica	2	12	7,00	12	454	491	25kV 50Hz
Sines	Santiago do Cacém	Bifásica	63	Bifásica	2	12	6,39	12	231	235	25kV 50Hz

As subestações de corrente contínua, apenas instaladas na linha de Cascais, funcionam com dois grupos transformador mais retificador a diodos, em ponte trifásica (6 pulsos), em paralelo, desfasados de 30°, o que resulta numa retificação global a 12 pulsos.

Em modo degradado, com a falha de um transformador, as subestações funcionam apenas com um grupo transformador mais grupo retificador de 6 pulsos.

A localização e as principais características das subestações de tração de corrente contínua são aquelas que se apresentam na Tabela 2.4 [8]:

Tabela 2.4 - Localização das SST CC da RFN. [8]

Linha	Subestação	Primário			Transformadores				Secundário
		Sistema	Nível de Tensão [kV]	Tipo de Ligação	Nº Trfs.	Potência Nominal por Trf. [MVA]	Tensão de Curto-Circuito [%]	Potência em Serviço [MVA]	Sistema
Cascais	Cais do Sodré	Trifásica	10	Retificação Trifásica	2	1,35	8	2 x 1,35	1,5kV DC
	Belém	Trifásica	10	Retificação Trifásica	2	2	8	2 x 2	1,5kV DC
	Cruz Quebrada	Trifásica	10	Retificação Trifásica	2	2	8	2 x 2	1,5kV DC
	Paço D'arcos	Trifásica	10	Retificação Trifásica	2	1,5	8	2 x 1,5	1,5kV DC
	Carcavelos	Trifásica	10	Retificação Trifásica	2	2	8	2 x 2	1,5kV DC
	S. Pedro Estoril	Trifásica	10	Retificação Trifásica	2	2	8	2 x 2	1,5kV DC

2.2 Comportamento do Sistema de Tração na Frequência

O sistema de tração ferroviário encontra-se atualmente num estado de desenvolvimento relativamente solidificado. Este sistema é projetado para funcionar normalmente em condições de exploração regulares e em certas condições de defeito, sem que sejam comprometidas as necessárias condições de fornecimento de energia e os seus valores nominais de tensão [7]. Por outro lado, na fase de projeto do sistema de tração ferroviário, não é usualmente tomado em consideração o comportamento na frequência deste sistema, como as frequências de ressonância.

Ao longo dos anos foram estudadas várias metodologias para caracterizar completamente o sistema de tração ferroviário [9], tomando como base as metodologias utilizadas para a caracterização de distribuição em alta tensão, por meio de matrizes de impedância. Esta metodologia englobava igualmente a posição geométrica dos condutores, as propriedades dos materiais e as ligações equipotenciais entre condutores.

Para a análise proposta, as impedâncias próprias e mútuas são suficientes para descrever o comportamento geral do sistema de tração a projetar. Neste tipo de análise, podem ser igualmente incluída também a distorção harmónica, as interferências de compatibilidade eletromagnética (CEM) e o comportamento sob descargas atmosféricas.

As frequências de ressonância teóricas podem ser diferentes das ressonâncias observadas no terreno por diferentes motivos, tais como as condições da infraestrutura ferroviária, as características do sistema de tração, o material circulante que opera nessa infraestrutura e também linhas de alta tensão que possam existir nas imediações do sistema de energia de tração a projetar [9].

Não obstante, é possível constatar pela literatura existente [9] que a frequências elevadas, a 1ª e 2ª frequência de ressonância do sistema, ou seja, as frequências para qual a impedância é máxima, são sempre as mesmas, pelo que estas são essencialmente caracterizadas pelas condições existentes no troço em questão, ou seja, apenas os fatores resistivos, indutivos e capacitivos do sistema de tração são importantes para a obtenção destas frequências de ressonância. A posição do material circulante apenas merece alguma consideração para as restantes frequências de ressonância, as quais variam consoante a posição deste. A influência do MC será maior quanto mais próximo este estiver dos extremos da secção alimentada por uma SST [10], e pela potência de cada transformador de potência deste.

Deste modo, é possível estudar o comportamento de um sistema de tração de um determinado troço alimentado por uma subestação (SST), tomando em consideração todos os parâmetros de um sistema de transmissão de linhas multicondutoras.

Uma aproximação teórica do comportamento do sistema de tração pode ser dada por uma configuração simples de dois condutores, os quais serão utilizados para estudar a interação da impedância da linha (catenária) com a corrente injetada pelos conversores de potência de tração do material circulante, vista pelo pantógrafo deste [11] [12].

Esta aproximação considera que a impedância das SST são nulas, e como tal os dois condutores do modelo simples são curto-circuitadas nas suas extremidades, onde resulta numa impedância da linha vista pelo pantógrafo dada por:

$$Z = Z_c \frac{\tanh(\gamma x) \tanh[\gamma(L - x)]}{\tanh(\gamma x) + \tanh[\gamma(L - x)]} \quad (2.1)$$

Onde Z_c , γ , x e L representam respetivamente a impedância característica [13], a constante de propagação, secção de comprimento intermédia e secção do comprimento total da linha em estudo.

A impedância característica e a constante de propagação podem ser calculadas respetivamente por:

$$Z_c = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{j\omega c}} \quad (2.2)$$

$$\gamma = \sqrt{j\omega c(r + j\omega l)} \quad (2.3)$$

Onde:

- r – Resistência da linha em p.u.;
- ω – Frequência angular da linha em rad/s;
- l – Indutância da linha em p.u.;
- c – Capacidade da linha em p.u.

Em que (2.2) e (2.3) estão dependentes dos parâmetros indutivos e capacitivos do sistema.

Deste modo, as ressonâncias elétricas podem ser identificadas pelo cálculo dos pólos da expressão (2.1), que significa o valor de impedância máximo obtido para a frequência em questão. Estas impedâncias máximas estão diretamente relacionadas com a posição (x) do comboio e a frequência (ω) tal como ilustrado na Figura 2.11.

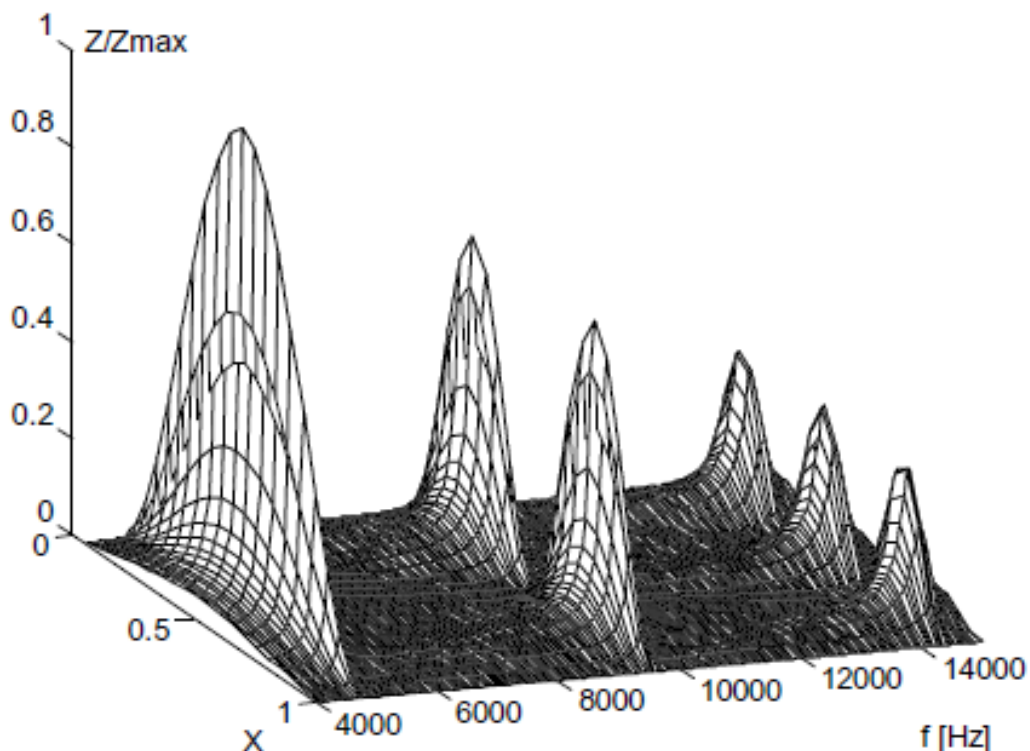


Figura 2.11 – Impedância do pantógrafo vs. Localização do comboio vs. Frequência. [9]

Não obstante, estas equações não-lineares, fazem recurso de expressões trigonométricas hiperbólicas de unidades complexas, pelo que a sua implementação em *softwares* de simulação numérica (como o *Matlab*) não pode implementada em domínios temporais. Desta forma, para resolver este problema,

são normalmente utilizados modelos com N quadripolos, conectados em série, os quais modelizam a rede de fornecimento de energia e de retorno ferroviários.

Este estudo é normalmente utilizado nas análises efetuadas destinadas a caracterizar um sistema de tração. Entre vários casos, este tipo de estudo foi já realizado para um troço da RFN, constante de [14].

Um sistema de tração é diferente de um sistema ideal de transmissão de energia, deste modo torna-se necessário avaliar a impedância (2.2) para diferentes valores de frequência na medida em que o parâmetro resistivo (r) é constante e o parâmetro indutivo (ωl) é dependente da variação de frequência.

Como tal, para aproximações mais complexas à realidade do sistema de tração destinadas a uma análise mais sucinta deste sistema, para a avaliação das várias características deste, tais como as frequências de ressonância, correntes de curto-circuito, tensões de contacto, entre outros, uma aproximação através do método de transmissão de linhas multicondutoras é o mais indicado para realizar este tipo de caracterizações.

2.3 Modelo Matemático de Transmissão de Linhas Multicondutoras

Tal como anteriormente referido, a ferrovia pode ser modelada como uma linha de transmissão de múltiplos condutores, assumindo que é constituída por dois ou mais condutores paralelos com comprimentos longos. Este pressuposto é de carácter importante para a avaliação das componentes indutivas e o respetivo acoplamento capacitivo da linha ferroviária com as restantes estruturas metálicas presentes na vizinhança desta. Um parâmetro fundamental da avaliação é a atual distribuição entre os diferentes condutores do caminho de retorno, formando a linha de transmissão de múltiplos condutores. Os modelos de linhas de transmissão multicondutoras (MTL) são aplicados tanto à frequência como análise no domínio do tempo de circuitos elétricos.

A formulação MTL requer os seguintes pressupostos fundamentais para que o mesmo possa ser aplicado:

- A linha é uniforme e sem alterações das características geométricas e físicas dos condutores que compõem o sistema;
- A soma algébrica das correntes de linha em qualquer plano transversal é zero, ou seja, a corrente de retorno dos condutores flui no condutor de referência;
- O meio que envolve os condutores deve ser linear, homogéneo e isotrópico.

Com o recurso a uma aplicação suportada na ferramenta *Matlab*, foi desenvolvido um modelo genérico do sistema de tração de 1x25 kV a 50 Hz. Este modelo, sintetiza o formalismo matemático e eletromagnético de cada componente do sistema elétrico ferroviário, permitindo estudar o seu comportamento à escala real, para diversas configurações possíveis. O modelo desenvolvido permite

a modelização matemática de linhas ferroviárias eletrificadas a 2 carris (podendo ser adaptado para um sistema a 3 carris), em via única, dupla ou múltipla, bem como para sistemas 2x25 kV. Na presente dissertação, o modelo será adaptado para o cálculo das curvas de ressonância do troço entre Muge e Canha alimentado pela SST de Quinta Grande (Figura 2.1), sendo que este troço se encontra na Linha de Vendas Novas [1], de via única e alimentado por uma catenária.

Utilizando um circuito de retorno baseado em ligações equipotenciais entre os vários condutores de retorno, designadamente os carris, CDTE e CDTA, obedecendo ao normativo de Retorno de Correntes de Tração, Terras e Proteções [15], foi possível reproduzir o comportamento do sistema de alimentação presente no troço alvo do presente estudo.

Atendendo à natureza do sistema de energia de tração aliado ao sistema de retorno, pode-se considerar que este sistema pode ser descrito como uma linha de transmissão multicondutora (MTL) [9], pois consiste num sistema com n condutores em paralelo que se estende por vários quilómetros. Um parâmetro fundamental que deriva deste sistema multicondutor é a distribuição de corrente que circulará em cada um destes condutores, formando a linha de transmissão multicondutoras.

No caso de um MTL genérico, as equações diferenciais parciais de 1ª ordem com n condutores acoplados galvanicamente são genericamente dadas respetivamente por (2.4) e (2.5) [16]:

$$\frac{\delta}{\delta z} V(z, t) = -RI(z, t) - L \frac{\delta}{\delta t} I(z, t) \quad (2.4)$$

$$\frac{\delta}{\delta z} I(z, t) = -GV(z, t) - C \frac{\delta}{\delta t} V(z, t)$$

Onde V é um vetor que contém as tensões dos n condutores em relação ao condutor de referência (terra), I é o vetor que contém as correntes dos condutores e R , L , G e C são as matrizes de tamanho $n \times n$ contendo os seus parâmetros. As matrizes de impedância e admitância com $n \times n$ condutores são genericamente dadas respetivamente por:

$$\begin{aligned} Z &= R + j\omega L \\ Y &= G + j\omega C \end{aligned} \quad (2.5)$$

Deste modo, a solução das equações do fasor geral do MTL para um comprimento total de linha L_{max} pode ser escrita sob forma da seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} V(L_{max}) \\ I(L_{max}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{11}(L_{max}) & \varphi_{12}(L_{max}) \\ \varphi_{21}(L_{max}) & \varphi_{22}(L_{max}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Onde $V(0)$ e $I(0)$ são as tensões e correntes no extremo mais perto, $V(Lmax)$ e $I(Lmax)$ são as tensões e correntes no extremo mais distante de cálculo. φ_{ij} são os parâmetros das submatrizes relacionados com os seguintes parâmetros elétricos [17]:

$$\begin{aligned}\varphi_{11} &= \cosh(\sqrt{ZY}L) \\ \varphi_{12} &= -Z_c \sinh(\sqrt{ZY}L) \\ \varphi_{21} &= -Z_c^{-1} \sinh(\sqrt{ZY}L) \\ \varphi_{22} &= \cosh(\sqrt{ZY}L)\end{aligned}\tag{2.7}$$

O MTL projetado para a aplicação genérica de estudo das características de um sistema de tração ferroviário, com n condutores acoplados galvanicamente, toma em consideração as impedâncias próprias e mútuas associadas aos n condutores por intermédio das equações de Carson-Clem. Estas equações conduzem a matrizes de impedâncias e capacitâncias entre condutores que se podem representar com base nas matrizes apresentadas nos subcapítulos seguintes.

2.3.1 Matriz de Impedâncias

A matriz das impedâncias, $[Z]$, é dada por:

$$[Z] = [Z_{int}] + [Z_{ext}]\tag{2.8}$$

$[Z_{int}]$ é uma matriz diagonal que representa a impedância interna dos n condutores e $[Z_{ext}]$ é a matriz simétrica que representa a impedância externa desses mesmos condutores.

A matriz da impedância externa $[Z_{ext}]$ é dada por:

$$[Z_{ext}] = [Z_g] + [Z_t]\tag{2.9}$$

$[Z_g]$ é uma matriz geométrica, isto é, está associada à localização geométrica dos condutores em relação a um plano transversal previamente definido e $[Z_t]$ é a matriz das impedâncias da terra.

Substituindo a expressão (2.9) em (2.8), é possível definir a matriz das impedâncias por:

$$[Z] = [Z_{int}] + [Z_g] + [Z_t]\tag{2.10}$$

No caso de uma linha eletrificada em via única, no sistema 1x25 kV a 50 Hz (Figura 2.8), o sistema possui como tal 5 condutores (o conjunto do fio de suporte/fio de contacto, CDTE, dois carris e o CDTA), onde a matriz $[Z]$ quadrada com o formato 5x5, terá a seguinte tipologia:

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

De acordo com [18], a impedância interna de um condutor pode ser aproximada a uma forma circular, mitigando desta forma a forma irregular que os carris possuem e eliminando o efeito da existência de cantos, embora neste último caso, o comportamento dos carris seja uma aproximação, face às características geométricas do carril. A resistência e a indutância interna resulta do fluxo interno eletromagnético do condutor, enquanto que a indutância externa resulta do fluxo magnético que é externo a este condutor e que se encontra na área compreendida entre este e o condutor de referência (Figura 2.13). Importa também referir que o comportamento desta impedância interna dos carris varia de acordo com a frequência a que está sujeita [17], designado o efeito pelicular, onde o fluxo da corrente se vai concentrando nas extremidades dos condutores à medida que a frequência aumenta. A impedância interna de cada condutor, nos termos da sua parte real e imaginária, é dada por:

$$Z_{int_i} = r_i + j\omega L_i \quad (2.12)$$

Em que:

- r_i – Raio do condutor em m;
- L_i – Indutância interna do condutor em H.

Desta forma, admitindo como circulares todos os condutores presentes no sistema de tração e retorno, é possível definir a impedância interna de cada condutor (Z_{int_i}), dependendo se a frequência é tal que o raio do condutor é menor ou maior que o efeito pelicular. Tomando em consideração o teor do capítulo 4.2.3 de [17], a dependência da frequência começa no ponto onde o raio do condutor é cerca de duas vezes o efeito pelicular. Desta forma é possível definir dois casos, respetivamente:

$$r_i < 2\delta \quad (2.13)$$

Ou

$$r_i > 2\delta \quad (2.14)$$

Em que:

$$r_i = \sqrt{\frac{A_i}{\pi}} \quad (2.15)$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \sigma_i}} \quad (2.16)$$

Onde:

- δ – Efeito pelicular (*skin depth*) em m;
- A_i – Área do condutor em m²;
- f – Frequência em Hz;
- μ_0 – Permeabilidade magnética do vazio em H/m;
- σ_i – Condutividade elétrica em S/m.

No caso de (2.13), tomando em consideração [17], a impedância interna de um dado condutor é dada por:

$$Z_{int_i} = r_i + j\omega L_i = \frac{1}{\sigma \pi r_i^2} + j\omega \frac{\mu_0}{8\pi} \quad (\Omega. m^{-1}) \quad (2.17)$$

No caso de (2.14), tomando em consideração [17], a impedância interna de um dado condutor é dada por:

$$Z_{int_i} = r_i + j\omega L_i = \frac{1}{2r_i} \sqrt{\frac{\mu_0}{\pi\sigma}} \sqrt{f} + j\omega \frac{1}{4\pi r_i} \sqrt{\frac{\mu_0}{\pi\sigma}} \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (\Omega. m^{-1}) \quad (2.18)$$

Considerando um exemplo com n condutores em relação a um plano idealmente condutor ilustrado na figura seguinte [17], utilizando o método das imagens, é possível obter a matriz $[Z_g]$ de impedâncias da localização geométrica dos condutores em relação a esse plano.

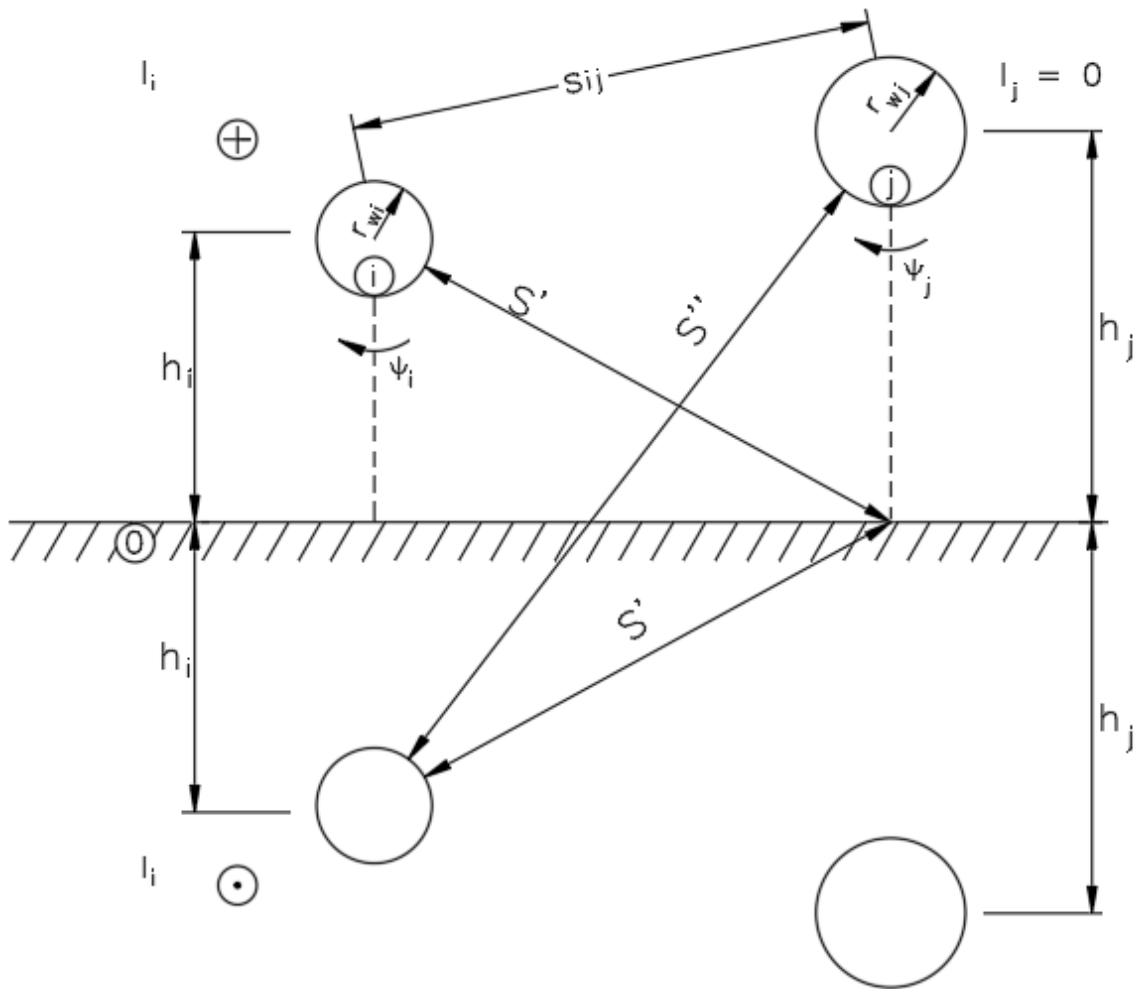


Figura 2.12 – Ilustração do cálculo das indutâncias por unidade de comprimento utilizando o método das imagens. [17]

Onde:

- r_{wi}/r_{wj} – Raio do condutor i/j;
- ψ_i/ψ_j – Fluxo magnético do condutor i/j;
- h_i/h_j – Altura do condutor i/j em relação a um plano de referência;
- s_{ij} – Plano entre o condutor i e j;
- s'_i – Plano entre o condutor i/j e o plano de referência do condutor j/i;
- s''_i – Plano entre o condutor i/j e o condutor imaginário j/i.

Desta forma, para um caso onde o número de condutores, n , a estudar assume o valor de 5 (sistema de tração de 1x25 kV a 50 Hz), as matriz de impedâncias internas e da localização geométrica é dada respectivamente por (2.19) e (2.20):

$$Z_{int} = \begin{bmatrix} Z_{int_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{int_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{int_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{int_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{int_5} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$[Z_g] = j\omega[L]_i = j\omega \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} & L_{15} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} & L_{25} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} & L_{35} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} & L_{45} \\ L_{51} & L_{52} & L_{53} & L_{54} & L_{55} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Onde:

$$L_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{r_{ii}}, D_e \approx 2h_i \text{ com } i=\{1,2,3,4,5\} \quad (2.21)$$

$$L_{ij} = L_{ji} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{d_{ij}}, D_e \approx s'' \text{ com } i,j=\{1,2,3,4,5\} \wedge i \neq j \quad (2.22)$$

De acordo com as equações de Carson-Clem, a corrente de retorno que circula pela terra (Figura 2.2 e Figura 2.8) pode ser aproximada a um condutor cilíndrico de raio D_e . Assim sendo, é assumido que os condutores indutores coincidem com o eixo do cilindro e a distância entre o eixo e o condutor induzido é dada por d_{ij} [17].

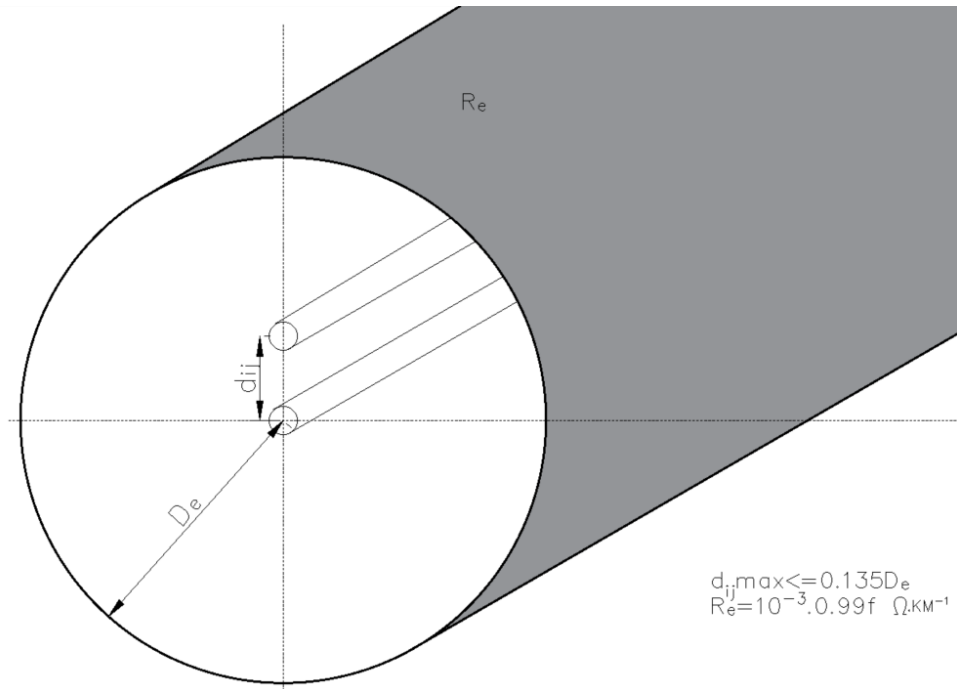


Figura 2.13 – Modelo equivalente do circuito de retorno.

De acordo com [17] a expressão para o cálculo de D_e é dado por:

$$D_e = 1,31\delta = 1,31 \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = 1,31 \sqrt{\frac{2}{2\pi\mu}} \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (m)} \quad (2.23)$$

Em que:

$$\mu = \mu_0\mu_r \quad (2.24)$$

Com o valor da resistividade do solo dada por:

$$\rho = [100,400] \text{ (}\Omega \cdot \text{m)} \quad (2.25)$$

Tomando em consideração as expressões (2.23), (2.24) e (2.25) pode-se então considerar que D_e é genericamente dado por [19]:

$$D_e = 659 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (m)} \quad (2.26)$$

Adicionalmente à resistência dos condutores, torna-se igualmente necessário tomar em consideração a resistência da terra, R_e . Tal como as matrizes anteriormente apresentadas, a impedância da terra

pode ser também definida numa matriz da impedância de terra, $[Z_t]$. Esta matriz é definida por ter os seus elementos com valor igual, ou seja, iguais ao valor de resistência de terra R_e dado por [17]:

$$R_e = Z_{t_{ii}} = Z_{t_{ij}} = Z_{t_{ji}} = \frac{\omega\mu_0}{8} = \pi^2 f \times 10^{-7} \quad (\Omega) \quad (2.27)$$

$$Z_t = \begin{bmatrix} \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} \\ \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} \\ \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} \\ \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} \\ \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} & \pi^2 f \times 10^{-7} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

A impedância de terra, conforme (2.27), é igual em todos os elementos da matriz e é independente da resistividade da terra., no entanto, esta varia com a frequência a qual está diretamente ligada ao efeito pelicular (*skin depth*), que tornará o retorno da corrente pela terra consoante a frequência a que está sujeita.

As matrizes das impedâncias apresentadas permitem assim calcular a impedância genérica de cada um dos condutores do sistema multicondutor, por unidade de comprimento, com a disposição dos condutores constituintes de um sistema 25 kV a 50 Hz representada num plano ortogonal, conforme Figura 2.14:

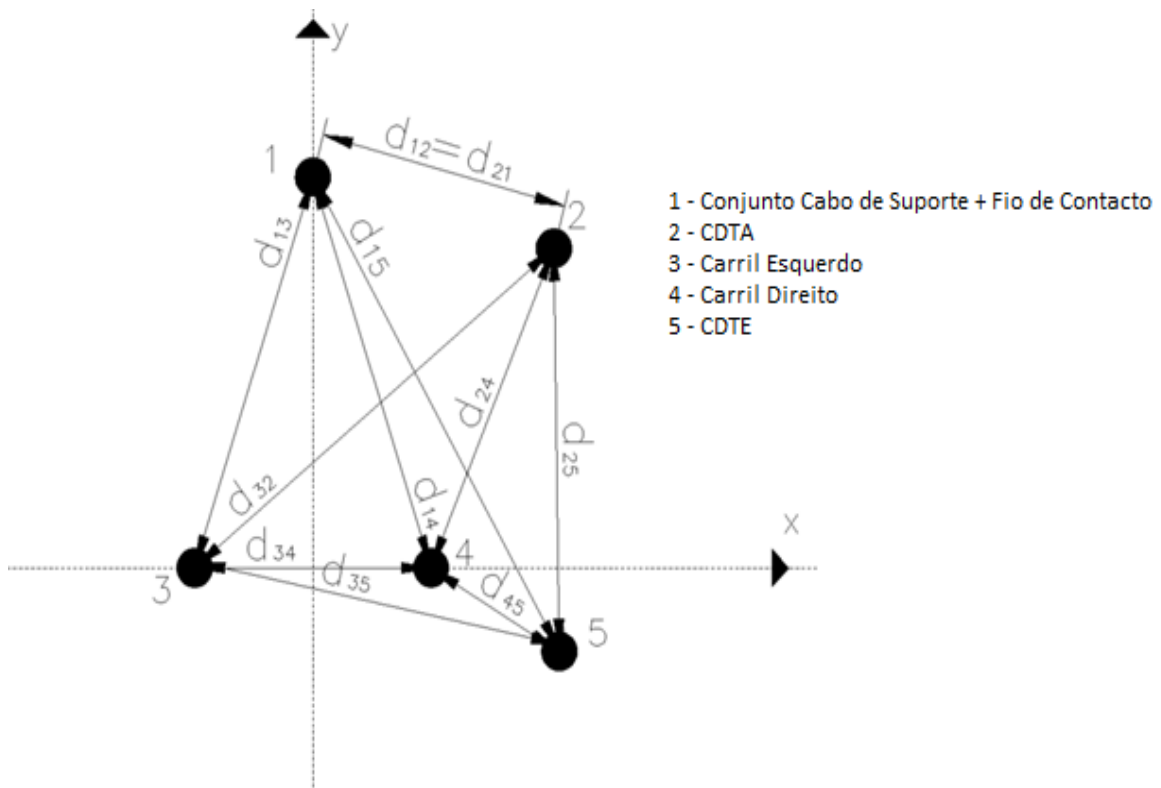


Figura 2.14 - Plano transversal da disposição dos condutores.

Em que 1, 2, 3, 4 e 5 correspondem respetivamente ao conjunto de fio de suporte e fio de contacto (com a secção equivalente), CDTA, carril esquerdo, carril direito e CDTE (Figura 2.2).

Desta forma, é possível definir as impedâncias próprias e mútuas respetivamente por:

$$[Z_{ii}] = [Z_{int_{ii}}] + [Z_{g_{ii}}] + [Z_{t_{ii}}] \quad (2.29)$$

$$[Z_{ij}] = [Z_{g_{ij}}] + [Z_{t_{ij}}] \quad (2.30)$$

2.3.2 Matriz de Capacitâncias

Para o cálculo das capacitâncias próprias e mútuas entre condutores, a formulação utilizada é igualmente baseada em [17], onde é assumido que a Terra é um condutor homogéneo perfeito (Figura 2.2).

Desta forma a matriz das capacitâncias [C] pode ser escrita de três formas diferentes, respetivamente (2.31), (2.32) e (2.33).

$$[C] = \mu\epsilon[L]^{-1} = \mu\epsilon \begin{bmatrix} \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{r_{11}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{13}}{d_{13}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{14}}{d_{14}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{15}}{d_{15}} \\ \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{21}}{d_{21}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{r_{22}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{23}}{d_{23}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{24}}{d_{24}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{25}}{d_{25}} \\ \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{31}}{d_{31}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{32}}{d_{32}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{r_{33}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{34}}{d_{34}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{35}}{d_{35}} \\ \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{41}}{d_{41}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{42}}{d_{42}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{43}}{d_{43}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{r_{44}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{45}}{d_{45}} \\ \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{51}}{d_{51}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{52}}{d_{52}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{53}}{d_{53}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{54}}{d_{54}} & \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{r_{55}} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.31)$$

$$[C] = \mu\epsilon \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \ln \frac{D_e}{r_{11}} & \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \ln \frac{D_{13}}{d_{13}} & \ln \frac{D_{14}}{d_{14}} & \ln \frac{D_{15}}{d_{15}} \\ \ln \frac{D_{21}}{d_{21}} & \ln \frac{D_e}{r_{22}} & \ln \frac{D_{23}}{d_{23}} & \ln \frac{D_{24}}{d_{24}} & \ln \frac{D_{25}}{d_{25}} \\ \ln \frac{D_{31}}{d_{31}} & \ln \frac{D_{32}}{d_{32}} & \ln \frac{D_e}{r_{33}} & \ln \frac{D_{34}}{d_{34}} & \ln \frac{D_{35}}{d_{35}} \\ \ln \frac{D_{41}}{d_{41}} & \ln \frac{D_{42}}{d_{42}} & \ln \frac{D_{43}}{d_{43}} & \ln \frac{D_e}{r_{44}} & \ln \frac{D_{45}}{d_{45}} \\ \ln \frac{D_{51}}{d_{51}} & \ln \frac{D_{52}}{d_{52}} & \ln \frac{D_{53}}{d_{53}} & \ln \frac{D_{54}}{d_{54}} & \ln \frac{D_e}{r_{55}} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.32)$$

$$[C] = 2\pi\epsilon \begin{bmatrix} \ln \frac{D_e}{r_{11}} & \ln \frac{D_{12}}{d_{12}} & \ln \frac{D_{13}}{d_{13}} & \ln \frac{D_{14}}{d_{14}} & \ln \frac{D_{15}}{d_{15}} \\ \ln \frac{D_{21}}{d_{21}} & \ln \frac{D_e}{r_{22}} & \ln \frac{D_{23}}{d_{23}} & \ln \frac{D_{24}}{d_{24}} & \ln \frac{D_{25}}{d_{25}} \\ \ln \frac{D_{31}}{d_{31}} & \ln \frac{D_{32}}{d_{32}} & \ln \frac{D_e}{r_{33}} & \ln \frac{D_{34}}{d_{34}} & \ln \frac{D_{35}}{d_{35}} \\ \ln \frac{D_{41}}{d_{41}} & \ln \frac{D_{42}}{d_{42}} & \ln \frac{D_{43}}{d_{43}} & \ln \frac{D_e}{r_{44}} & \ln \frac{D_{45}}{d_{45}} \\ \ln \frac{D_{51}}{d_{51}} & \ln \frac{D_{52}}{d_{52}} & \ln \frac{D_{53}}{d_{53}} & \ln \frac{D_e}{d_{54}} & \ln \frac{D_e}{r_{55}} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.33)$$

Tomando em consideração que D_{ij} é igual a s'' (Figura 2.12), para o cálculo de D_{ij} é utilizado o método das imagens. Esta distância indica-nos a distância de um condutor i e a imagem de um condutor j relativamente a um plano de referência, sendo este plano normalmente utilizado como a terra, conforme exemplificado na Figura 2.15:

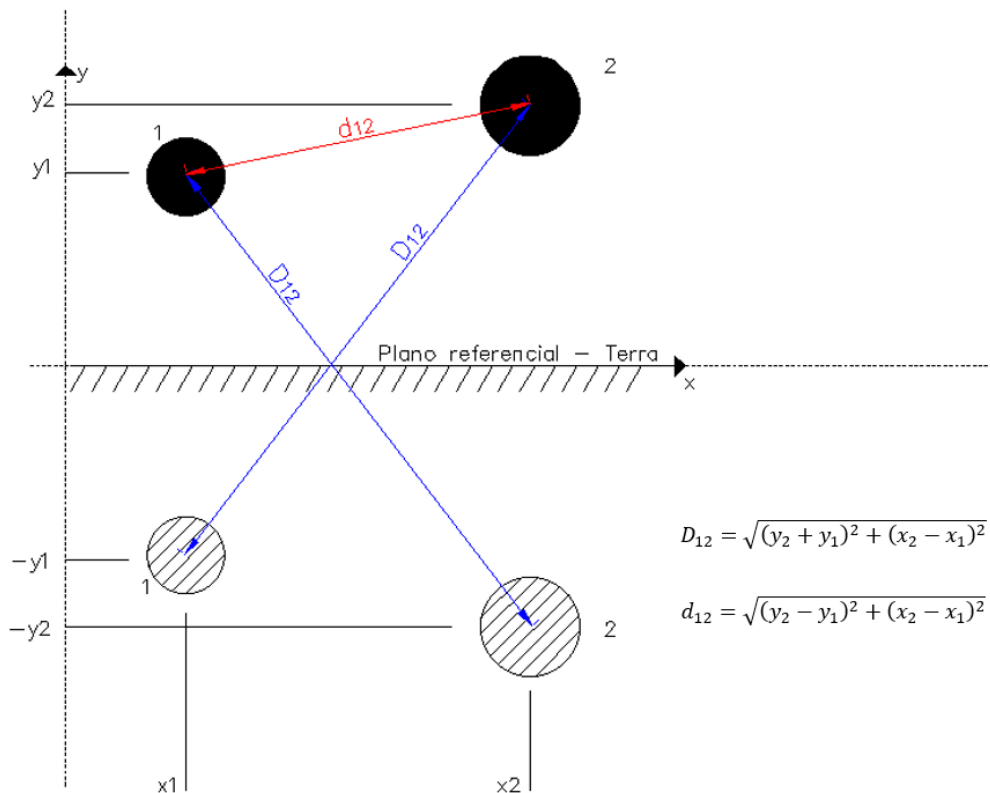


Figura 2.15 - Cálculo de distâncias pelo método das imagens.

2.3.3 Modelo Equivalente da Subestação

As características de uma subestação de tração encontra-se definido no capítulo 2.1, pelo que se pode admitir como tipologia simplificada a seguinte representação para uma SST de tração ferroviária, conforme exemplo ilustrativo da Figura 2.16 (elementos representados genericamente):

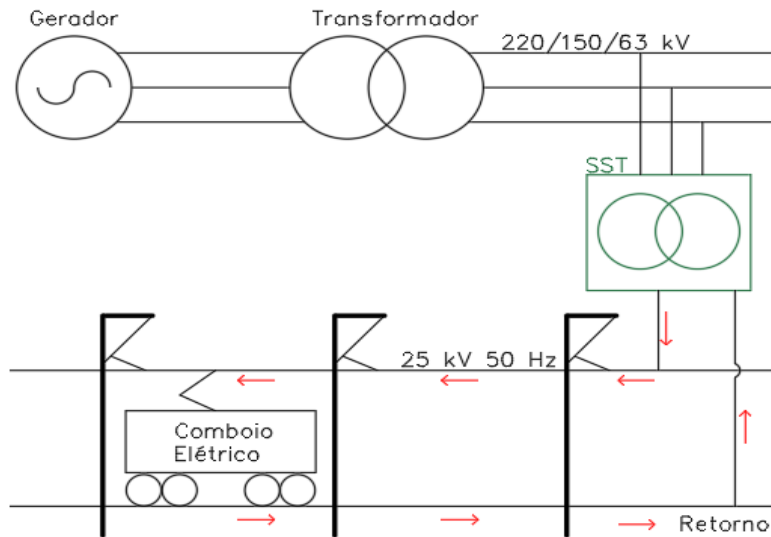


Figura 2.16 - Tipologia de um sistema de alimentação ferroviária. [20]

O modelo equivalente da subestação utilizado apenas toma em consideração o transformador de potência que alimenta um determinado troço. Desta forma, as características dos equipamentos de alta tensão presentes na SST e que podem ser consultados em [5], não foram tomados em consideração para a construção do modelo equivalente da subestação, merecendo apenas especial destaque as características elétricas do transformador de potência desta.

A subestação de tração elétrica possui uma ligação bifásica à catenária, em que uma destas fases se encontra ligada à terra. Como se trata de uma SST bifásica, existem dois transformadores, estando apenas um a realizar serviço e outro em reserva, necessitando assim de modelizar apenas um transformador no modelo matemático elaborado.

Desta forma, o esquema equivalente do transformador utilizado no modelo matemático é o apresentado na Figura 2.17:

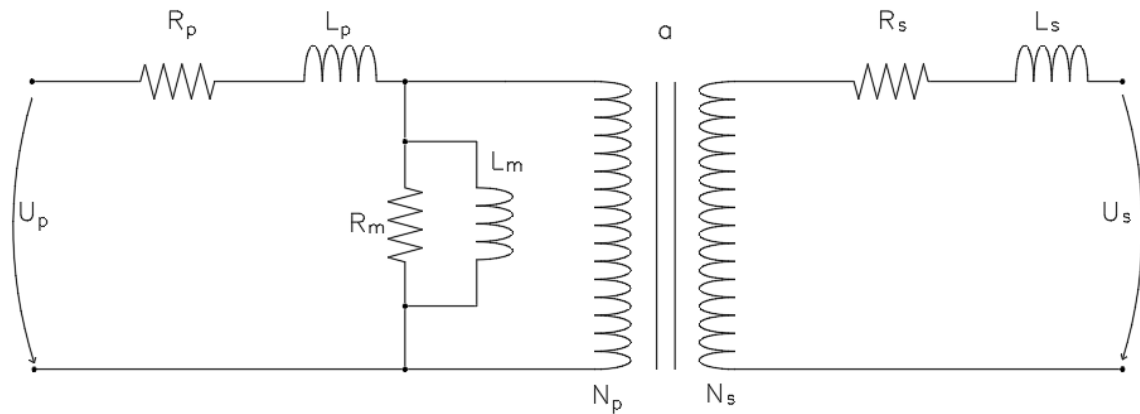


Figura 2.17 - Modelo equivalente do transformador da Subestação de Tração.

Os parâmetros das variáveis apresentadas na Figura 2.17 podem ser consultados no Anexo C, bem como em resumo na Tabela 2.5:

Tabela 2.5 - Parâmetros do Transformador

Descrição	Variável	Valor
Potência Nominal	Pn_{transf}	16,2 MVA
Frequência	-	50 Hz
Tensão no primário	$Vbase_{prim}$	150 kV
Resistência do enrolamento primário	Rh_{tr}	1,44 Ω
Indutância do enrolamento primário	Lh_{tr}	0,2156 H
Tensão no secundário	$Vbase_{sec}$	27,5 kV
Resistência do enrolamento secundário	Rl_{tr}	0,0435 Ω
Indutância do enrolamento secundário	Ll_{tr}	0,0065 H
Resistência de magnetização	$Ratm$	1,6187 M Ω
Indutância de magnetização	$Latm$	2,7939 kH

3. Conteúdo Harmónico do Material Circulante

Material circulante diesel ou eléctrico são os dois tipos mais predominantes no meio ferroviário. Estes dois sistemas possuem na sua principal diferença a forma de fornecimento de energia de cada um. Um utiliza como fornecedor de energia um gerador a diesel que alimentará os motores destinados à tração, enquanto que o outro utiliza uma rede eléctrica para fornecimento de energia (catenária).

Para o âmbito da presente dissertação apenas merecem destaque as características do material circulante eléctrico, mais concretamente o conteúdo harmónico produzido pelos conversores de tração do material circulante que é emitido para as infraestruturas de tração eléctrica, podendo interferir com as características de fornecimento de energia.

Este tipo de MC (Figura 3.1) é constituído tipicamente por um pantógrafo, transformador de potência para adequação dos 25 kV à tensão de operação dos equipamentos do comboio, retificadores monofásicos totalmente controlados AC/DC, um barramento DC, onduladores e os motores AC que transformam energia eléctrica em energia mecânica para fornecer aos rodados de tração.

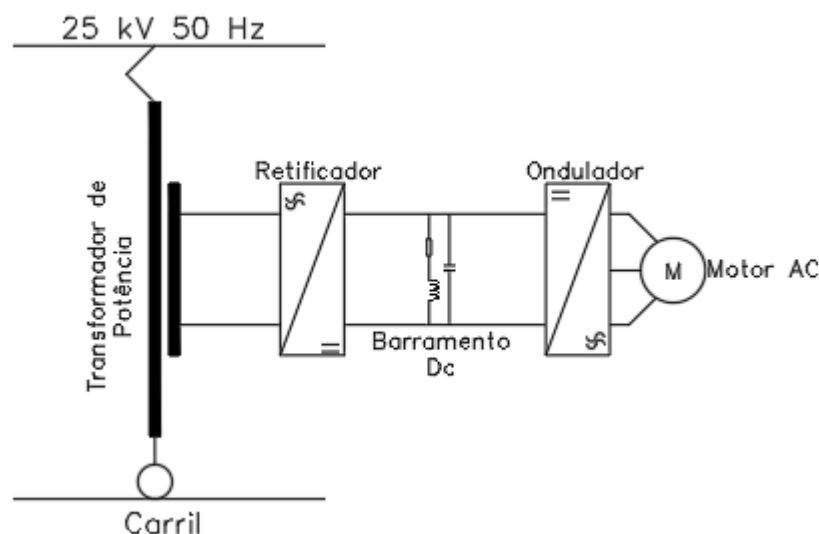


Figura 3.1 - Constituintes tipo de material circulante eléctrico. [20]

O conteúdo harmónico do MC eléctrico é principalmente gerado pelos conversores de tração presentes neste tipo de comboios. A principal contribuição do conteúdo harmónico resulta do funcionamento do retificador monofásico totalmente controlado. Estes conversores são normalmente conversores a operar em quatro quadrantes de funcionamento, constituídos normalmente por semicondutores do

tipo GTO ou IGBT, sendo a principal diferença entre estes dois (retificador e ondulador) a sua frequência de comutação.

Os conversores de tração presentes neste tipo de material circulante, produzem harmónicas de tensão e corrente, as quais estarão serão agregadas ao conteúdo harmónico do sistema de alimentação ferroviário. Este fenómeno leva a uma amplificação das harmónicas injetadas pelos conversores de tração no sistema de fornecimento de energia, ou seja, na catenária e na subestação a tensão e corrente irão existir para além da componente fundamental, também uma componente harmónica resultante da operação dos conversores de tração. Uma amplificação destas harmónicas causará consecutivamente, um aumento da tensão no local onde o veículo se encontra ou até num outro lugar da secção alimentada pela subestação onde o veículo se encontre.

As IFTE têm por isso picos de ressonância derivados dos seus parâmetros, indutivos e capacitivos. A presença de material circulante no troço alimentado por determinada SST irá igualmente provocar alterações ao comportamento da ressonância neste.

Desta forma, a frequência de comutação destes conversores tem de ser tomada em consideração na medida em que poderá coincidir com as frequências de ressonância das SST existentes na RFN.

Esta frequência de operação dos conversores de tração pode também mudar, através do efeito de soma, caso exista mais que uma unidade eléctrica acoplada, alterando o espectro harmónico produzido por uma composição eléctrica acoplada.

Conforme explícito em 1.2, a presente dissertação apenas irá avaliar as condições de operação na frequência das UTE's de Silício da série 2240 [21], a qual é ilustrada na figura seguinte, e compará-las com as frequências de ressonâncias da SST de Quinta-Grande, obtidas na simulação que será descrita no capítulo seguinte.



Figura 3.2 - Unidade Tripla Elétrica (UTE) série 2240 - Configuração em unidade simples. (Figura do autor Raul Marques)

As características elétricas da UTE de Silício são as seguintes [22]:

Tabela 3.1 - Características Elétricas da UTE de Silício da série 2240. [22]

Tensão [V]	Frequência [Hz]	Potência [kW]
25000	50	1281

A escolha desta automotora para análise no âmbito da presente dissertação prende-se com o facto de esta ter sofrido no passado fenómenos de ressonância com a SST do Entroncamento (Figura 2.1) associados ao seu funcionamento no troço alimentado por esta SST, o que resultou numa modificação da frequência de comutação dos seus conversores de tração, nomeadamente de 450 Hz para 650 Hz. Esta mudança foi realizada após ensaios CEM aos conversores de potência das UTE 2240 por parte da IP, os quais demonstraram interferências da frequência de operação deste MC com o comportamento na frequência do troço alimentado pela SST do Entroncamento.

Cada unidade simples UTE possui dois conversores de tração, os quais funcionam em paralelo. Cada conversor possui dois braços, em que cada braço possui uma frequência de comutação de 650 Hz. A onde gerada é uma onda triangular de 650 Hz. Os dois braços deste conversor funcionam em oposição de fase (180°), resultando num entrelaçamento das correntes triangulares, o que resulta numa soma frequência de operação na gama dos 1300 Hz. Desta forma, a corrente no secundário de um dos enrolamentos secundários do transformador de potência é cortada à frequência de 1300 Hz. As componentes harmónicas destes conversores encontram-se nas harmónicas ímpares imediatamente a volta dessa frequência, ou seja, 1300 ± 50 Hz. A energia é “consumida” à frequência fundamental, 50 Hz da rede, e apenas a amplitude desta é variável, enquanto que todas as restantes componentes harmónicas preservam uma amplitude constante e independente da corrente que é consumida.

As frequências de operação dos conversores de tração presentes neste tipo de material circulante foram obtidas através da empresa REFER (na data da realização dos ensaios), atualmente IP. Essas frequências de operação podem ser consultadas em [2], tendo sido as gravações do conteúdo harmónico disponibilizadas por parte desta empresa para análise na presente dissertação.

A cadeia de medida para obtenção das frequências de comutação destes conversores de tração foram retiradas no ponto de ligação à terra do primário do transformador de potência presente neste tipo de automotoras [23]. Deste modo, pode ser avaliada a influência das frequências de comutação dos conversores do lado da entrega de energia na catenária. A cadeia de medida utilizada encontra-se ilustrada na Figura 3.3:

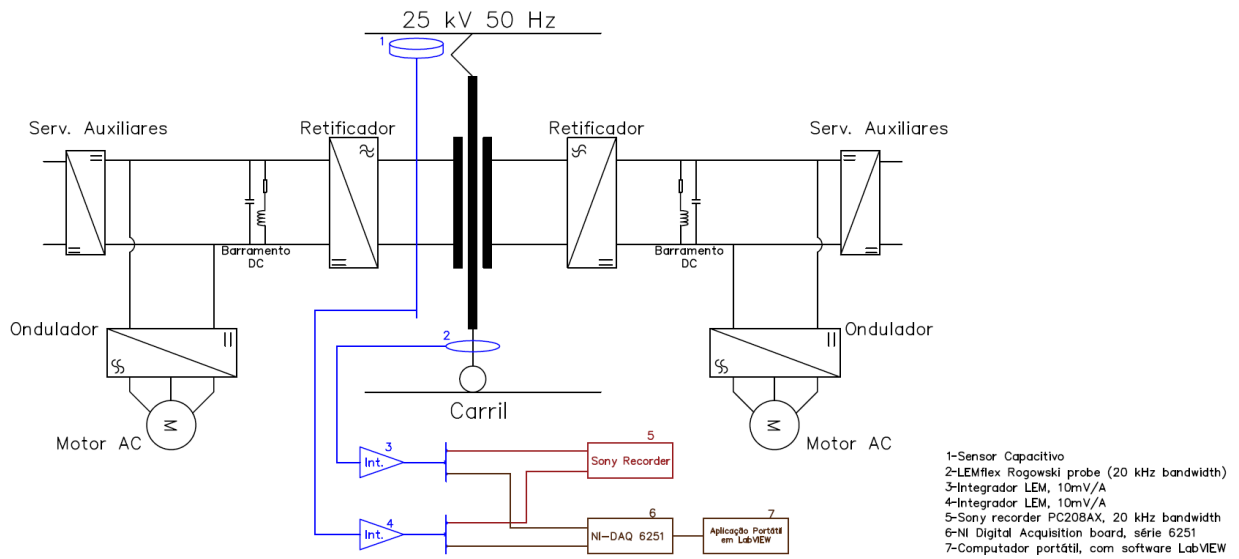


Figura 3.3- Cadeia de medição para obtenção de conteúdo harmónico dos conversores de tração. [2]

As gravações disponibilizadas pela IP encontravam-se gravadas em fita magnética (Figura 3.4) por meio de sinais analógicos. Estas gravações possuíam os seguintes dados:

- Tensão medida na Catenária;
- Corrente medida numa unidade motora;
- Corrente medida noutra unidade motora;
- Soma das Correntes (ocasionalmente).

Deste modo, foi necessário proceder à conversão destes dados analógicos em fita magnética para um formato digital, onde fosse possível adquirir os dados e proceder à sua manipulação necessária à correta interpretação dos mesmos.

No âmbito do presente estudo, foi desenvolvido um programa na ferramenta de programação *LabVIEW*, destinada a converter os dados armazenados em fita magnética aquando dos ensaios realizados pela IP. Este programa desenvolvido poderá ser utilizado no futuro para ensaio de outras tipologias de MC que pretenda realizar serviço nas linhas ferroviárias portuguesas.

Para realizar esta conversão foi necessário utilizar as cassetes de fita magnética onde estavam guardados os registos dos ensaios realizados às UTE da série 2240.



Figura 3.4 - Cassete de fita magnética de armazenamento dos dados de ensaio.

Estas cassetes foram introduzidas no gravador Sony (Figura 3.5) utilizado na data da realização dos ensaios de obtenção destas características. Este equipamento permite não só a gravação de dados em formato analógico, como permite igualmente a reprodução destes por intermédio de fichas do tipo BNC, que podem ser acopladas a um osciloscópio ou a um instrumento de aquisição de dados.



Figura 3.5 - Gravador Sony PCA208Ax.

Como anteriormente exposto, os sinais que são reproduzidos no gravador Sony podem ser ligados a um instrumento de aquisição de dados, tendo sido utilizado neste caso a placa de aquisição da National Instruments com a referência NI-DAQ 6259.

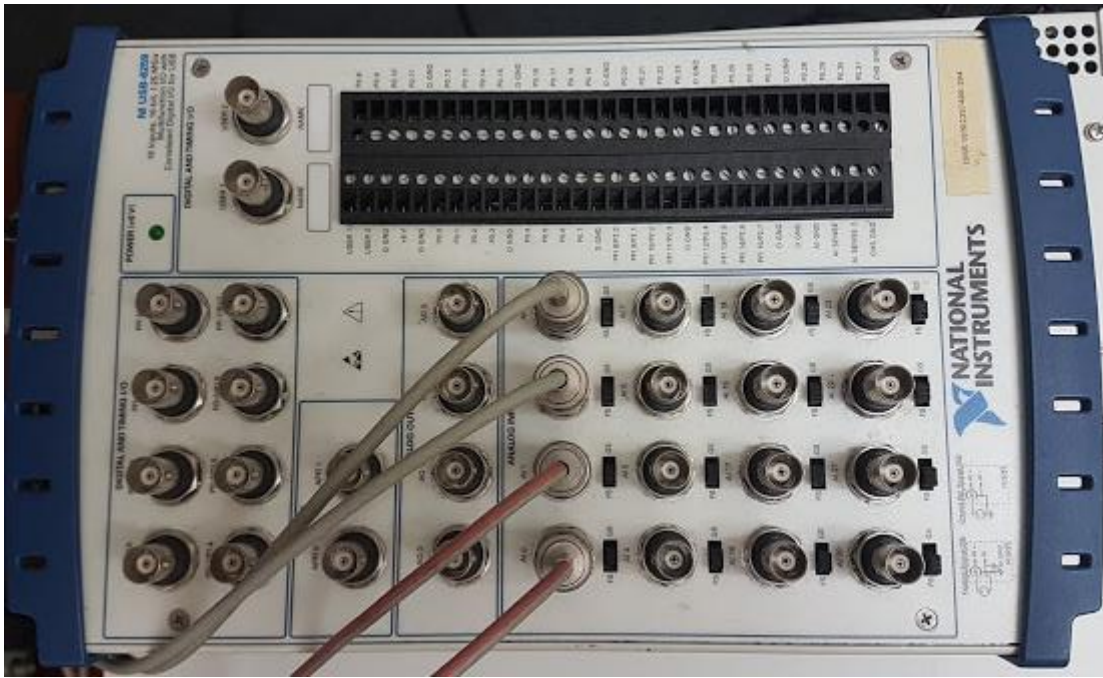


Figura 3.6 – NI-DAQ 6259.

As especificações desta placa encontram-se dispostas no Anexo D.

Esta placa da NI é então ligada a um computador por intermédio de uma ligação USB que realizará a comunicação dos dados adquiridos para uma aplicação desenvolvida num software em *LabVIEW* (Figura 3.7).

Este software é específico da NI e possui as ferramentas necessárias para adquirir e manipular sinais recebidos pela placa NI-DAQ 6251. Para conseguir tal objetivo, este software utiliza uma linguagem de programação gráfica. Deste modo, teve de ser igualmente desenvolvido um software nesta aplicação em formato de aplicação para conseguir adquirir os sinais recebidos pela placa NI, manipular os mesmos e por fim guardar estes num formato editável passíveis de serem alterados posteriormente.



Figura 3.7 – Disposição geral dos equipamentos.

São apresentadas de seguida excertos de imagens ilustrativas do *software* desenvolvido para a obtenção do espectro harmónico dos sinais guardados nas cassetes de fita magnética.

O *software* desenvolvido em *LabVIEW* foi especificamente construído para a leitura, transformação de dados e armazenamento digital de informação dos valores, armazenados nas cassetes de fita magnética, de tensão e corrente das UTE de SI da série 2240.

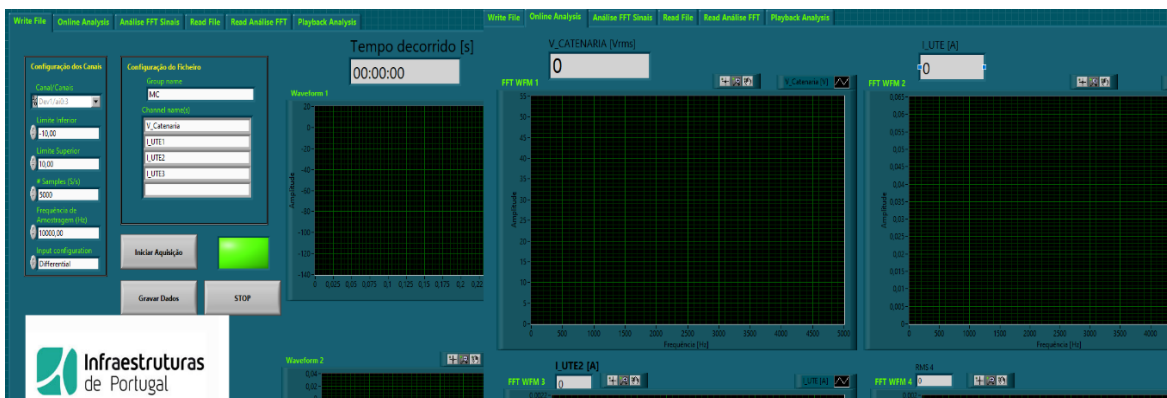


Figura 3.8 -Excerto do Front Panel da aplicação LabVIEW desenvolvida.

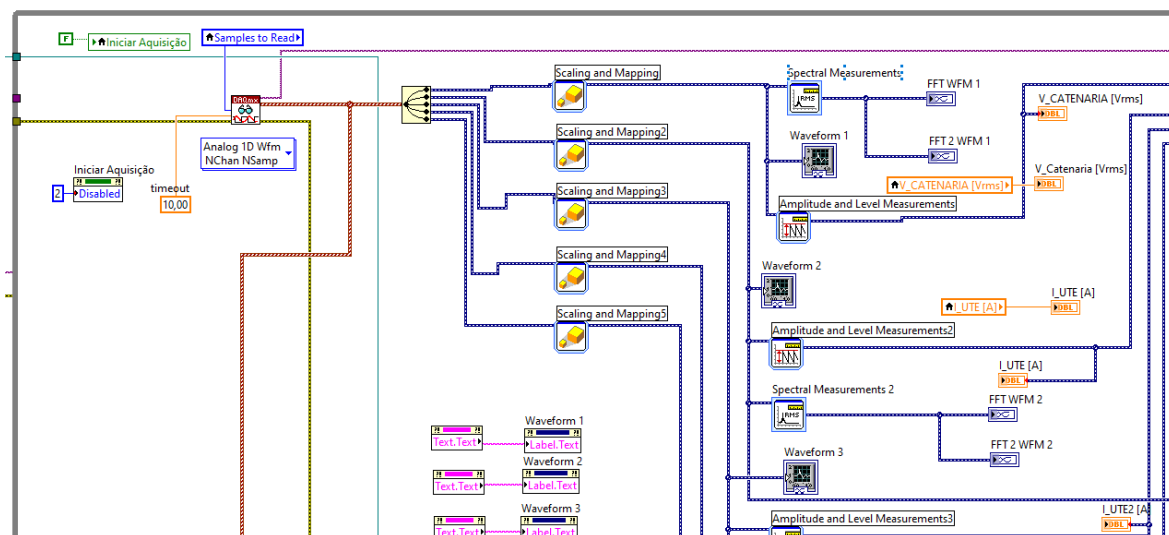


Figura 3.9 – Excerto do *Block Diagram* da aplicação LabVIEW desenvolvida.

Na reprodução das gravações foram retiradas imagens em determinados *frames* da gravação para que fosse possível apresentar uma série de resultados. Não obstante sejam apenas apresentados dois exemplos de seguida, no Anexo A serão apresentadas todas as imagens retiradas em *frames* específicos das várias gravações disponibilizadas pela IP.

A gravação que se encontra gravada na fita magnética possuía, conforme referido, os sinais analógicos que são amostrados no tempo, ou seja, num domínio temporal. Por forma a melhor avaliar a influência destes dados na frequência, foi realizada através do software *LabView* desenvolvida uma análise recorrendo ao método *Fast Fourier Transform* (FFT), o qual permite que um sinal temporal seja representado no domínio da frequência, permitindo a avaliação dos sinais gravados através do seu espectro de frequência.

A Figura 3.10 representa o espectro harmónico obtido em formato digital após a conversão dos sinais analógicos das fitas magnéticas. Dispõe-se então o resultado do espectro harmónico da corrente produzida numa unidade motora em modo simples de uma automotora CP 2240 (Figura 3.3) em que a frequência de comutação de cada braço dos conversores de tração se situa na banda dos 650 Hz. A Figura 3.10 permite identificar a soma do conteúdo harmónico das correntes resultante do entrelaçamento das correntes nos dois braços dos conversores de tração (Figura 3.3), ou seja, uma frequência de operação na ordem dos 1300 Hz.

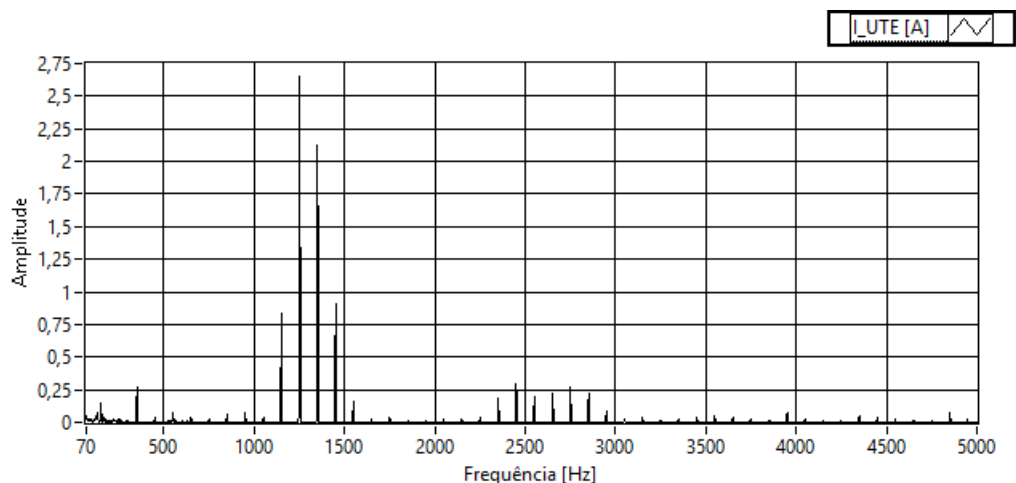


Figura 3.10 - Conteúdo harmônico de uma unidade simples UTE.

Importa referir que estas automotoras na maior parte dos serviços que efetuam, se deslocam em unidades duplas ou triplas, ou seja, duas ou três UTE acopladas, pelo que podem ser utilizados tantos conversores quanto seja necessário, ou seja, no caso de serem utilizadas UTE em unidade dupla, podemos ter até 4 conversores a funcionar em pleno, em que cada um dos conversores possui 2 braços. Na figura seguinte (Figura 3.11) é possível visualizar o entrelaçamento de três conversores de tração, em que cada braço possui uma frequência de comutação de 650 Hz:

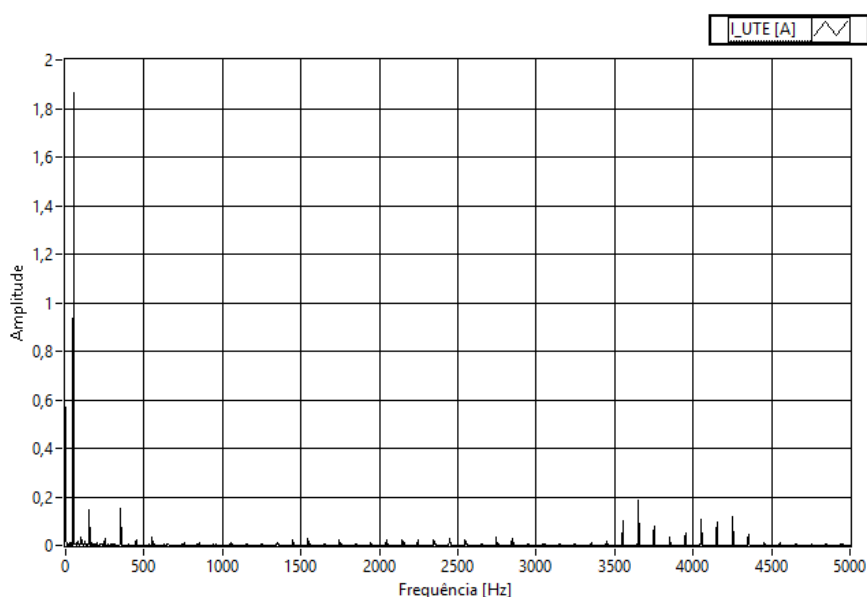


Figura 3.11 - Conteúdo harmônico produzido pelo entrelaçamento de três conversores.

Desta forma, o conteúdo harmônico produzido pela comutação dos conversores de tração deste tipo de material circulante poderá introduzir perturbações no lado da catenária entrando em ressonância com as IFTE projetadas para determinado troço. Importa então avaliar a compatibilidade entre estes dois subsistemas ferroviários, infraestrutura vs. material circulante, na medida em que as condições de operação de ambos não interfiram entre eles.

Na Tabela 3.2, são caracterizadas as frequências de comutação principais dos conversores de tração das UTE's de SI, da série 2240 da CP, bem como da ordem das harmónicas onde existe conteúdo harmónico. Estes valores estão em linha com os valores obtidos em [7] onde os valores de ressonância encontram-se na generalidade dentro dos mesmos intervalos observados.

Tabela 3.2- Características espectrais dos conversores de tração das UTE de SI.

Conteúdo harmónico produzido UTE		
Quantidade de conversores	Frequência de comutação de cada braço do conversor [Hz]	Frequência de operação [Hz] \pm 50 Hz
1	650	1300
2		2600
3		3900
4		5200
5		6500
6		7800

Tal como exposto anteriormente, é possível ainda confirmar que o conteúdo harmónico produzido pelas unidades UTE de SI encontra-se nas harmónicas ímpares imediatamente à volta da frequência de comutação dos seus conversores de tração, quer esta esteja a funcionar em unidade simples, ou acoplada em unidade dupla ou tripla.

Os fenómenos de ressonância dos conversores de tração do material circulante com as instalações fixas de tração eléctrica manifestam-se pelo aparecimento de uma tensão elevada na gama de frequências de comutação dos conversores de tração das UTE de SI a série 2240. Nas imagens da Figura 3.12 e Figura 3.13, bem como no Anexo A será possível constatar alguns fenómenos de ressonância.

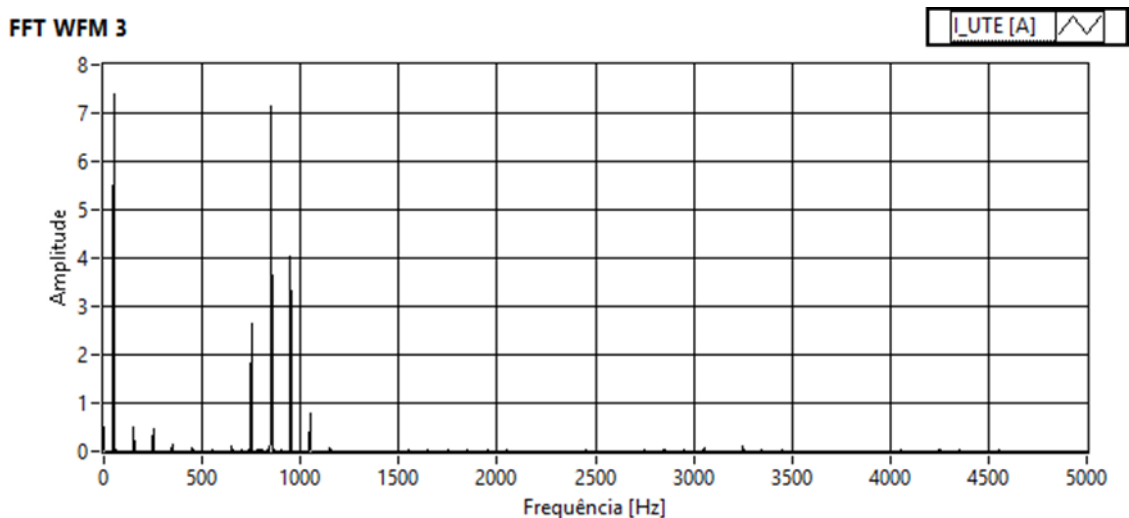


Figura 3.12 - Espectro harmónico da corrente numa unidade motora CP 2240.

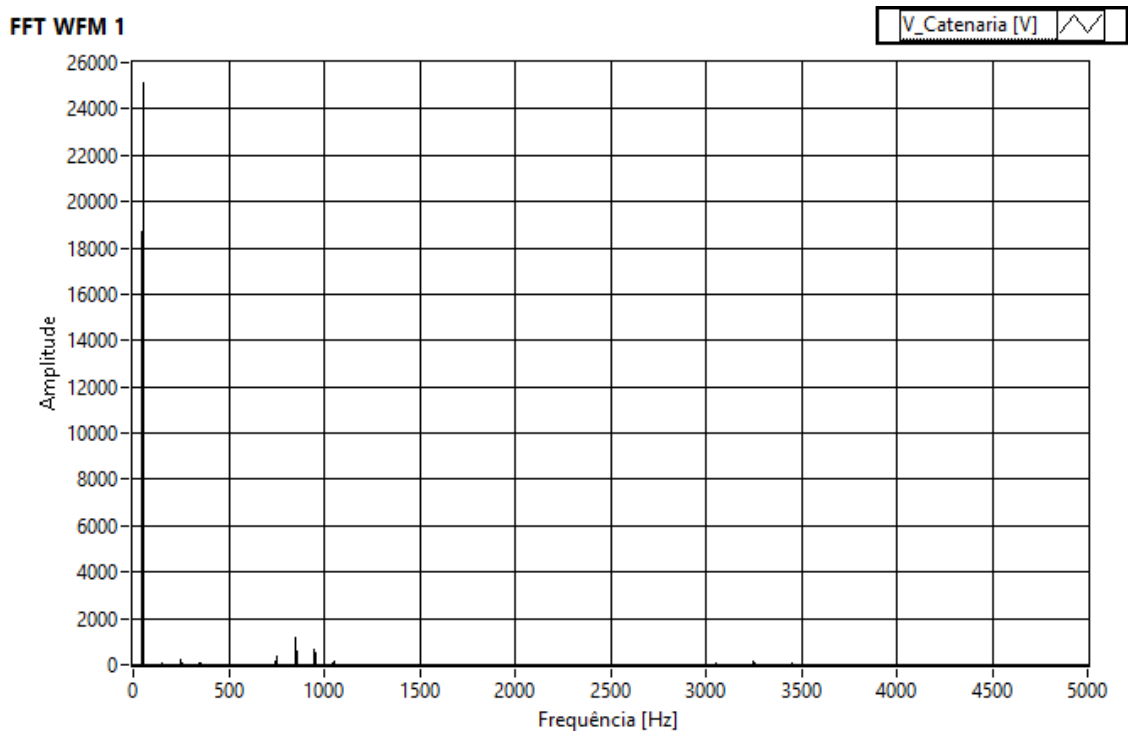


Figura 3.13- Espectro harmónico da tensão medida na catenária.

Como é possível observar na Figura 3.12, constata-se que as frequências de comutação de cada braço dos conversores de tração utilizados nas automotoras na data deste ensaio se situavam na casa dos 450 Hz, o que não acontece aos dias de hoje. Como possui os dois braços dos conversores a funcionar, e as correntes se encontram entrelaçadas, o conteúdo harmónico obtido situa-se nos 900 Hz, aparecendo, como anteriormente exposto, conteúdo harmónico nas harmónicas ímpares imediatamente à volta desta frequência.

Analisada a Figura 3.13 constata-se que na faixa de frequência de operação dos conversores de tração ilustrados na Figura 3.12 aparece uma tensão que se situa entre os 700 V – 1500 V, indicando que neste local, muito provavelmente se encontrava um fenómeno de ressonância entre o material circulante e as instalações fixas de tração eléctrica, isto é, a Subestação que alimenta o troço, possuindo esta igualmente uma frequência de ressonância na gama de valores idênticos à frequência de comutação dos conversores de tração.

4. Caracterização da Simulação

O presente capítulo destina-se a descrever o processo de simulação com um detalhe suficiente para instruir o processo de simulação numérica utilizada para atingir os objetivos da presente dissertação. No âmbito da presente dissertação o *case-study* escolhido, tal como anteriormente referido, é o estudo do troço ferroviário alimentado pela SST de Quinta-Grande na Linha de Vendas Novas, que compreende geograficamente os troço entre a Zona Neutra de Muge até à Zona Neutra de Canha, conforme é possível constatar pela consulta do Anexo B.

Desta forma são caracterizados na Tabela 4.1, os elementos condutores e os elementos de retorno característicos de uma instalação ferroviária eletrificada.

Tabela 4.1 - Parâmetros dos Condutores Ativos e de Retorno.

Condutores	Área [m ²]	σ [S/m]	ρ [Ω m]	μ_r [H/m]	Posição no eixo xx [m] ¹	Posição no eixo yy [m] ¹
Catenária ²	$1,64 \times 10^{-4}$	$5,6 \times 10^7$	$1,7857 \times 10^{-8}$	1	0	6,2
CDTE ²	$7,8 \times 10^{-5}$	$1,12 \times 10^7$	$8,95 \times 10^{-8}$	1	2,5	0
Carril 1 [18]	$7,69 \times 10^{-3}$	4×10^6	143×10^{-9}	5	-0,834	0,65
Carril 2 [18]	$7,69 \times 10^{-3}$	4×10^6	143×10^{-9}	5	0,834	0,65
CDTA ²	$9,3 \times 10^{-5}$	$3,57 \times 10^7$	$2,8 \times 10^{-8}$	1	3,3	6,87

Os modelos que serão apresentados no subcapítulo seguinte fazem uso das variáveis que foram apresentadas no capítulo 2.3. Desta forma serão apresentadas de seguida os cálculos necessários apenas para a catenária (Figura 2.2) por forma a não sobrecarregar o presente documento, pois os outros condutores seguem a mesma lógica de cálculo.

É apresentado de seguida os cálculos necessários para obter as equações de Carson-Clem da Catenária.

Sabendo que a permeabilidade magnética do vácuo é dada por:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)} \quad (4.1)$$

A permeabilidade magnética da catenária é dada por (4.2):

¹ Conforme Figura 2.16 - Tipologia de um sistema de alimentação ferroviária.

² Os valores indicados para este condutor foram obtidos através de divulgação interna da IP.

$$\mu_{catenária} = \mu_r \times \mu_0 = 1 \times 4\pi \times 10^{-7} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad (4.2)$$

Admitiu-se no presente estudo que a resistividade da terra, em termos gerais, é dada por (4.3):

$$\rho_{terra} = 100 \text{ } (\Omega\text{m}) \quad (4.3)$$

A frequência angular é dada por:

$$\omega = 2\pi f \quad (4.4)$$

Atribuindo o valor de 50 Hz para a frequência f, a frequência angular resultante de (4.4) é de:

$$\omega = 100\pi \text{ (rad/s)} \quad (4.5)$$

Tal como definido nas equações (2.15) e (2.16), torna-se necessário calcular o raio e o efeito pelicular associado à frequência em análise (neste exemplo, uma frequência de 50 Hz). Deste modo o cálculo do raio para o condutor equivalente da catenária é dado por:

$$r_{catenária} = \sqrt{\frac{A_{catenária}}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,64 \times 10^{-4}}{\pi}} = 0,0072 \text{ (m)} \quad (4.6)$$

O efeito pelicular é então dado por:

$$\delta_{catenária} = \frac{1}{\sqrt{\pi \times f \times \mu_{catenária} \times \sigma_{catenária}}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \times 50 \times (4\pi \times 10^{-7}) \times (5,6 \times 10^7)}} = 0,0095 \text{ (m)} \quad (4.7)$$

Utilizando agora o critério de Paul Clayton [17], definido nas equações (2.13) e (2.14) obtém-se respectivamente:

$$r_{catenária} = 0,0072 \text{ (m)} \quad (4.8)$$

$$2 \times \delta_{catenária} = 2 \times 0,0095 = 0,019 \text{ (m)}$$

Como $r_{catenária} < 2 \times \delta_{catenária}$, a impedância interna do condutor vem dada por (4.9):

$$Z_{int_{catenária}} = r_{catenária} + j\omega L_{catenária} = \frac{1}{\sigma_{catenária} \times \pi \times r_{catenária}^2} + j\omega \frac{\mu_{catenária}}{8\pi} \quad (4.9)$$

$$Z_{int_{catenária}} = \frac{1}{5,6 \times 10^7 \times \pi \times 0,0072^2} + j\omega \frac{4\pi \times 10^{-7}}{8\pi} = 0,0001 + j0,00002 \text{ } (\Omega)$$

Com base em (4.9) é possível retirar a resistência e indutância internas do condutor, sendo que a resistência interna é dada por:

$$R_{int_{catenária}} = r_{catenária} = \frac{1}{(5,6 \times 10^7) \times \pi \times 0,0072^2} = 0,0001 \text{ (}\Omega\text{)} \quad (4.10)$$

E a indutância interna por:

$$L_{int_{catenária}} = \frac{j \times Z_{int_{catenária}}}{\omega} = \frac{j \times (0,0001 + j0,00002)}{100\pi} = 5 \times 10^{-8} \text{ (H)} \quad (4.11)$$

Desta forma a matriz de impedâncias internada apresentada em (2.19), para o condutor da catenária ficaria preenchida da seguinte forma:

$$Z_{int} = \begin{bmatrix} 0,0001 + j0,00002 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{int_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{int_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{int_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{int_5} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Torna-se então necessário calcular a componente da impedância associada à localização geométrica do condutor da catenária. Tomando por base a equação apresentada em (2.20), torna-se necessário calcular as impedâncias próprias e mútuas associadas à localização geométrica dos condutores. Desta forma, terão de ser inicialmente calculadas as distâncias entre o condutor equivalente da catenária e os restantes. As coordenadas dos condutores podem ser consultadas na Tabela 4.1.

$$d_{Cat-CDTE} = \sqrt{(xx_{CDTE} - xx_{Cat})^2 + (yy_{CDTE} - yy_{Cat})^2} = \sqrt{(2,5 - 0)^2 + (0 - 6,2)^2} = 6.69 \text{ (m)}$$

$$d_{Cat-Carril1} = d_{Cat-Carril2} = 5,61 \text{ (m)} \quad (4.13)$$

$$d_{Cat-CDTA} = 3,37 \text{ (m)}$$

Calculando agora o raio do círculo por onde a corrente de retorno circula, definido na equação (2.26), D_e é dado por:

$$D_e = 659 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 659 \sqrt{\frac{100}{50}} \cong 932 \text{ (m)} \quad (4.14)$$

Calculando os elementos da matriz $[L]_i$ definida em (2.20), a impedância própria da catenária e as impedâncias mútuas entre os restantes condutores. Definidas em (2.21) e (2.22), são as seguintes:

$$L_{Cat_i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{r_{Cat}} = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \ln \frac{932}{0,0072} \cong 2,354 \times 10^{-6} \text{ (H)} \quad (4.15)$$

$$L_{Cat-CDTE_i} = L_{CDTE-Cat_i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{d_{Cat-CDTE}} = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \ln \frac{932}{6,69} \cong 9,873 \times 10^{-7} \text{ (H)}$$

$$L_{Cat-Carril1_i} = L_{Cat-Carril2_i} \cong 1,022 \times 10^{-6} \text{ (H)}$$

$$L_{Cat-CDTA_i} \cong 1,124 \times 10^{-6} \text{ (H)}$$

Desta forma, tomando em consideração os valores obtidos anteriormente, resulta a matriz das impedâncias próprias e mútuas associadas ao condutor da catenária seguinte³:

$$[Z_g] = j100\pi \begin{bmatrix} 2,354 \times 10^{-6} & 9,873 \times 10^{-7} & 1,022 \times 10^{-6} & 1,022 \times 10^{-6} & 1,124 \times 10^{-6} \\ 9,873 \times 10^{-7} & L_{22} & L_{23} & L_{24} & L_{25} \\ 1,022 \times 10^{-6} & L_{32} & L_{33} & L_{34} & L_{35} \\ 1,022 \times 10^{-6} & L_{42} & L_{43} & L_{44} & L_{45} \\ 1,124 \times 10^{-6} & L_{52} & L_{53} & L_{54} & L_{55} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Calculando agora as capacidades próprias e mútuas, associadas ao condutor da catenária com base em (2.33), torna-se necessário desde já calcular as distâncias entre condutores tomando em consideração um plano de referência de terra. Deste modo, as distâncias D_{ij} são calculadas conforme ilustrado na Figura 2.15:

$$D_{Cat-CDTE} = \sqrt{(xx_{CDTE} - xx_{Cat})^2 + (yy_{CDTE} + yy_{Cat})^2} = \sqrt{(2,5 - 0)^2 + (0 + 6,2)^2} = 6,69 \text{ (m)}$$

$$D_{Cat-Carril1} = D_{Cat-Carril2} = 6,90 \text{ (m)} \quad (4.17)$$

$$D_{Cat-CDTA} = 13,48 \text{ (m)}$$

A constante de permissividade do vácuo é representada pela seguinte formulação:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi K} = \frac{1 \times 10^{-9}}{36\pi} \cong 8,85 \times 10^{-12} \text{ (Fm}^{-1}\text{)} \quad (4.18)$$

$$\text{com } K \cong 9 \times 10^9 \text{ (Nm}^2\text{C}^{-2}\text{)}$$

Calculando os elementos da matriz $[L]_c$ definidos em (2.33):

$$L_{Cat_c} = \ln \frac{2h_{cat}}{r_{cat}} = \ln \frac{2 \times 6.2}{0,0072} \cong 7,45 \text{ (H)} \quad (4.19)$$

³ Apenas se considerou o condutor da catenária para o presente exemplo, bem como apenas é considerada uma frequência de 50 Hertz (frequência da componente fundamental). A totalidade dos cálculos encontra-se disposta no Anexo C.

$$L_{Cat-CDTE_c} = L_{CDTE-cat_c} = \frac{D_{Cat-CDTE}}{d_{Cat-CDTE}} = \ln \frac{6,69}{6,69} \cong 0 \text{ (H)}$$

$$L_{Cat-Carril1_c} = L_{Cat-Carril2_c} \cong 0,21 \text{ (H)}$$

$$L_{Cat-CDTA_c} \cong 1,39 \text{ (H)}$$

Com base em (4.18) e (4.19) a matriz das capacidades próprias e mútuas resultante é a seguinte:

$$[C] = 2\pi\epsilon \begin{bmatrix} 7,45 & 0 & 0,21 & 0,21 & 1,39 \\ 0 & \infty & 0 & 0 & 0 \\ 0,21 & 0 & 3,27 & 0,24 & 0,14 \\ 0,21 & 0 & 0,24 & 3,27 & 0,17 \\ 1,39 & 0 & 0,14 & 0,17 & 7,83 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0,08 & 0,08 & 0,004 & 0,004 & 0,014 \\ 0 & \infty & 0 & 0 & 0 \\ 0,004 & 0 & 0,17 & 0,012 & 0,002 \\ 0,004 & 0 & 0,012 & 0,17 & 0,003 \\ 0,014 & 0 & 0,002 & 0,003 & 0,07 \end{bmatrix} \times 10^{-10} \text{ (F)} \quad (4.20)$$

4.1 Implementação

Na Figura 4.1 é apresentado o layout esquemático do troço alimentado pela SST de Quinta Grande com a identificação das várias estações.

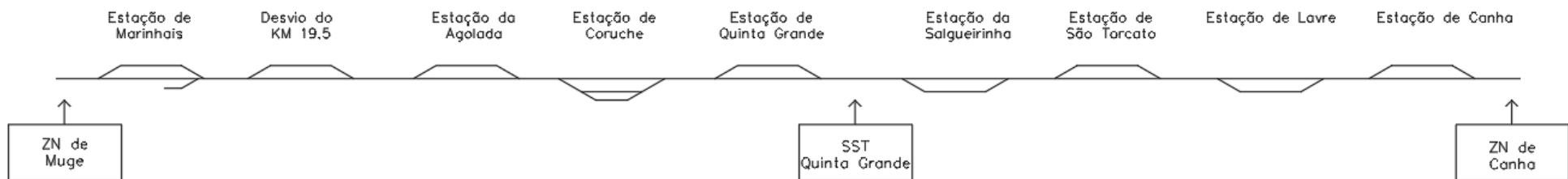


Figura 4.1 - Layout esquemático do troço alimentado pela SST de Quinta Grande.

Na Figura 4.2 é apresentado o esquema global de simulação construído no *Simulink*, representativo do troço alimentado pela SST de Quinta Grande (Figura 2.1).

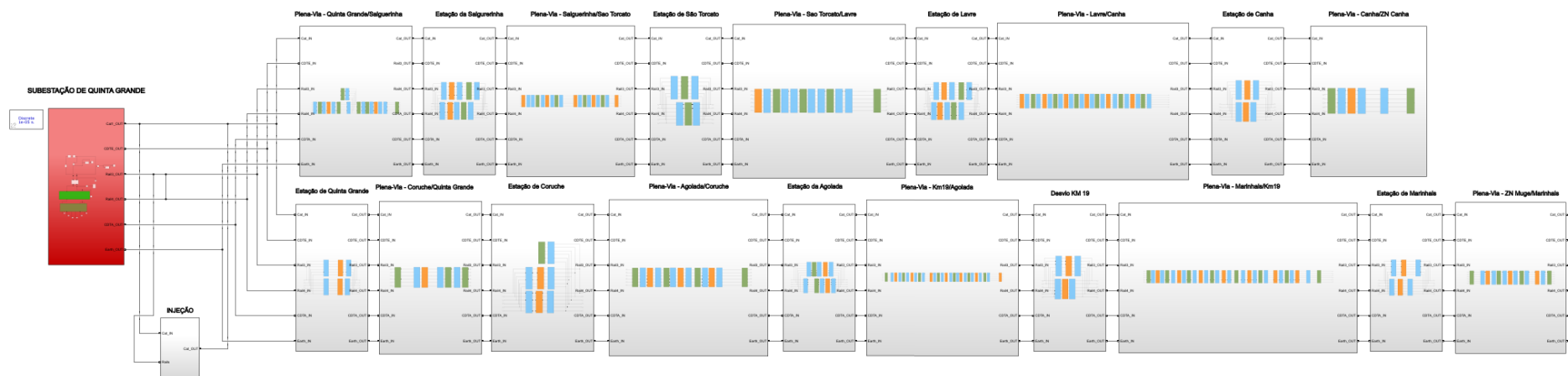


Figura 4.2 – Modelo do troço alimentado pela SST de Quinta Grande.

4.2 Modelos Utilizados na Simulação

Serão apresentados nos subcapítulos seguintes os vários modelos criados na aplicação *Simulink*, correspondentes aos vários blocos necessários para proceder à simulação e obtenção das curvas de ressonância elétrica.

Todos os modelos de cada bloco *Simulink* e variáveis apresentadas nos subcapítulos seguintes poderão ser identificadas respetivamente no Anexo C e Anexo E

4.2.1 Subestação

A subestação, tal como descrito em 2.3.3, apenas considera um modelo equivalente do transformador de potência presente nas SST. Considera igualmente as impedâncias de um dos ramos de fornecimento de energia por parte da REN ou EDP.

Por forma a proteger a rede a montante do transformador de potência de eventuais harmónicas de corrente produzidas pelo modelo de injeção de corrente, é realizado um curto-circuito entre as fases que ligam no lado primário do transformador de potência, evitando assim que a perturbação do conteúdo harmónico produzido pelo modelo de injeção da corrente se propague para a rede de distribuição de energia elétrica.

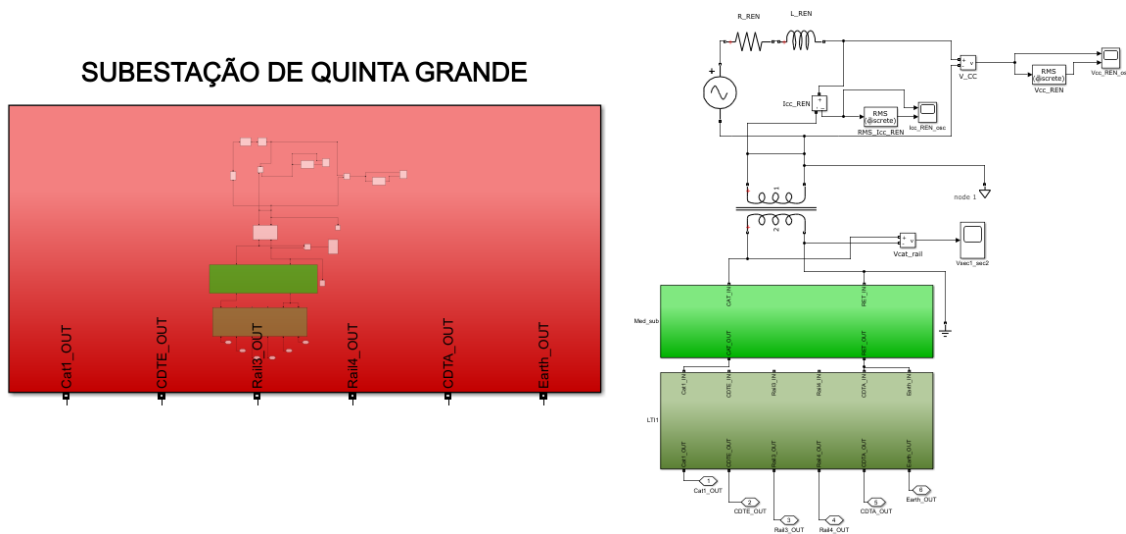


Figura 4.3 - Modelo da Subestação (Quinta Grande).

Tabela 4.2 - Características AC Voltage Source e Ramal de Fornecimento de Energia.

Amplitude de Pico [V]	$Vat1_peak$
Fase [°]	0
Frequência [Hz]	50
Tempo de Amostragem	0
R_REN [Ω]	R_REN
L_REN [H]	L_REN

As características do transformador linear utilizado nas simulações encontram-se dispostas na Figura 4.4, sendo os seus parâmetros calculados a partir das informações obtidas através da análise do relatório de ensaios do transformador da SST, constante do Anexo G, as quais se indicam igualmente na Tabela 4.3:

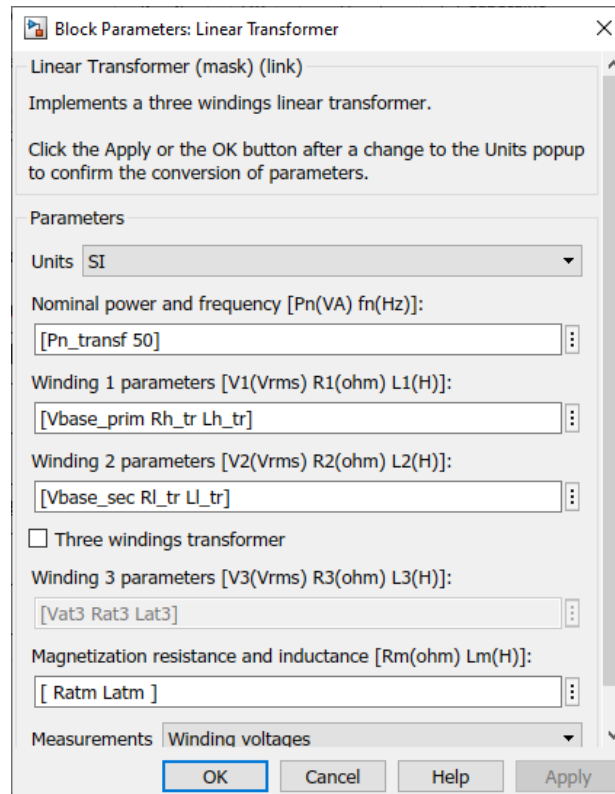


Figura 4.4 - Características do Transformador Linear.

Tabela 4.3 - Valores dos parâmetros do Transformador Linear.

Pn_Transf	$16,2 \times 10^6$
Vbase_prim	150×10^3
Rh_tr	1,44
Lh_tr	0,2156
Vbase_sec	25×10^3
Rl_tr	0,0435
Ll_tr	0,0065
Ratm	$1,6187 \times 10^3$
Latm	$2,7939 \times 10^3$

4.2.2 Injeção de Corrente

O modelo de injeção de corrente baseia-se num circuito equivalente de Norton, onde é colocada a fonte de corrente constante, mas com a frequência variável, em paralelo com uma resistência (conforme representado na Figura 4.5).

A frequência é variável e está relacionada com as frequências de comutação dos conversores, conforme exemplificado nas Figura 3.10, Figura 3.11 e Figura 3.12

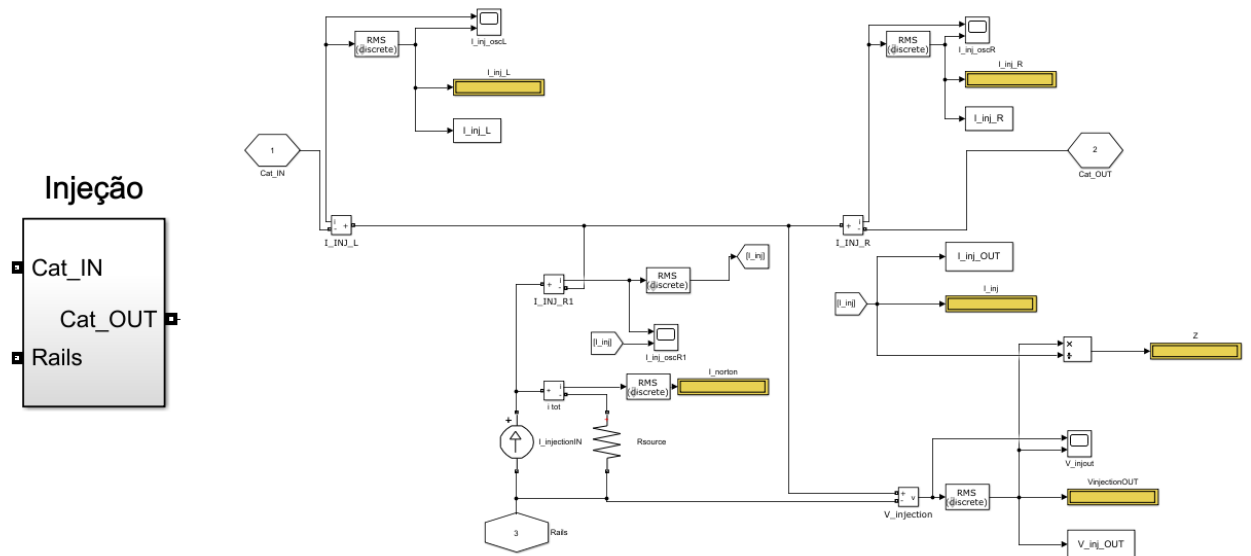


Figura 4.5 - Modelo de injeção de corrente.

As características deste modelo constam da Tabela 4.4:

Tabela 4.4 - Características do modelo de injeção de corrente.

Amplitude de Pico [A]	100
Fase [°]	0
Frequência [Hz]	f
Tempo de Amostragem	0
Rsource [Ω]	10

O valor da resistência utilizado, teve como base a garantia que o cálculo numérico convergia, isto é, para valores mais baixos de “Rsource”, o cálculo poderá apresentar problemas em não conseguir convergir.

O valor “ f ” irá ser alterado durante a simulação, pois o mesmo resulta do varrimento na frequência que irá ser realizado entre os 50 Hz e os 10 kHz.

4.2.3 Linhas Multicondutoras

O modelo desenvolvido é dividido em seções de comprimento variável, dependendo da resolução desejada ou do tipo de seção. Cada seção representa um trecho da linha multicondutora. A dimensão da matriz associada a cada MTL é $n \times n$. Cada bloco MTL tem $n + 1$ entradas e saídas, face ao condutor de referência de terra. Os modelos apresentados na Figura 4.6 materializam respectivamente um trecho de via “MTL”, com um comprimento definido como constante de 500 metros, uma “LTI” e uma “LEAE” e assim sucessivamente.

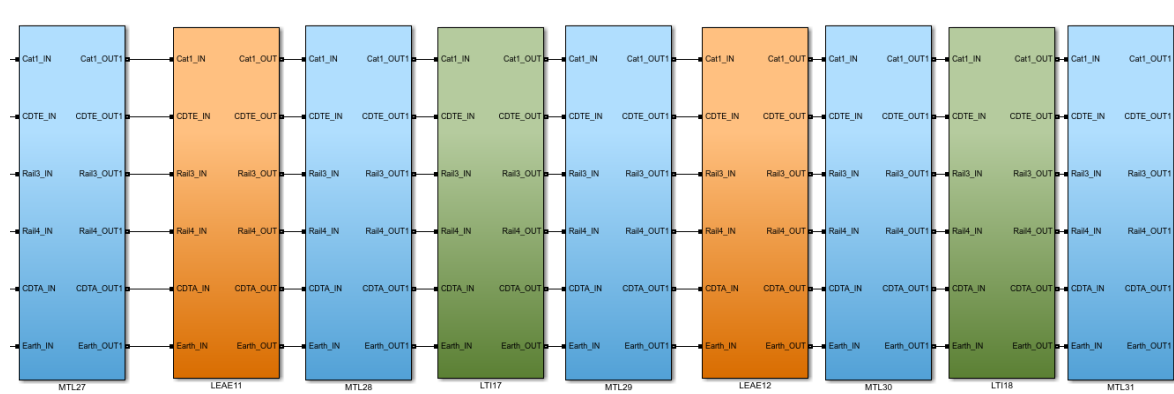


Figura 4.6 - Excerto de um trecho MTL do modelo criado.

Uma Ligação Transversal Integral (LTI), segundo [15], materializa uma ligação equipotencial entre todos os condutores de retorno, ou seja, entre os carris, CDTE e CDTA. Uma Ligação Equipotencial entre o cabo de terra Aéreo e o cabo de terra Enterrado (LEAE), materializa uma ligação equipotencial apenas entre os condutores de retorno CDTA e CDTE. A quantidade de ligações LTI e LEAE é definida em [15] através de distâncias entre estas.

Para a disposição dos blocos apresentados no excerto da Figura 4.6, foi tomado em consideração o projeto de catenária, materializado no Esquema Longitudinal de Catenária da SST de Quinta-Grande, presente na Linha de Vendas Novas, constante do Anexo B. Não obstante, face à complexidade de reproduzir integralmente o disposto no projeto referido, foi necessário adotar uma harmonização entre as várias ligações. Desta forma, na grande parte do trecho a distância entre LTI-LEAE foi de 500 metros, ou seja, um bloco MTL entre cada uma destas ligações.

Conforme exposto, cada bloco MTL (azul) corresponde a um trecho de 500 metros de via, o bloco LEAE (laranja) corresponde à ligação equipotencial entre CDTA e CDTE e o bloco LTI (verde) corresponde à ligação equipotencial entre carris, CDTA e CDTE.

Na Figura 4.7 é apresentado o bloco MTL:

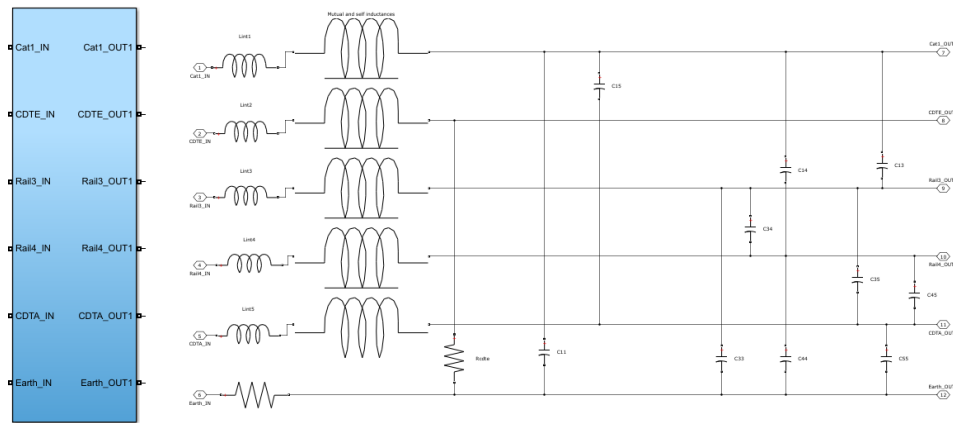


Figura 4.7 - Bloco MTL.

Como é possível observar, neste bloco são tomados em consideração diversas variáveis, representativas das interação entre os vários condutores, isto é, as indutâncias e capacitâncias dos condutores ou entre estes, as quais foram calculadas com base nos cálculos de exemplo apresentados em 4, os quais poderão ser igualmente consultados no Anexo C. Para este bloco em específico, os valores das impedâncias internas dos condutores, as indutâncias próprias e mútuas, bem como as capacidades próprias e mútuas entre condutores assumem os valores a tomar em consideração. Importa igualmente referir que, face ao CDTE estar em contacto com a terra, a capacidade deste em relação à terra é substituída pela sua resistência, a qual pode ser consultada em [15].

Desta forma, são apresentados na Tabela 4.5 os parâmetros a considerar para este bloco (Figura 4.7):

Tabela 4.5 - Parâmetros do MTL.

Lint1, Lint2, Lint3, Lint4, Lint5 [H]	lint1, lint2, lint3, lint4, lint5
Rearth [Ω]	Re
Rcdte [Ω]	Rcdte_scale
C11, C33, C44, C55 [F]	C(1,1), C(3,3), C(4,4), C(5,5)
C13, C14, C15, C34, C35, C45 [F]	C(1,3), C(1,4), C(1,5), C(3,4), C(3,5), C(4,5)

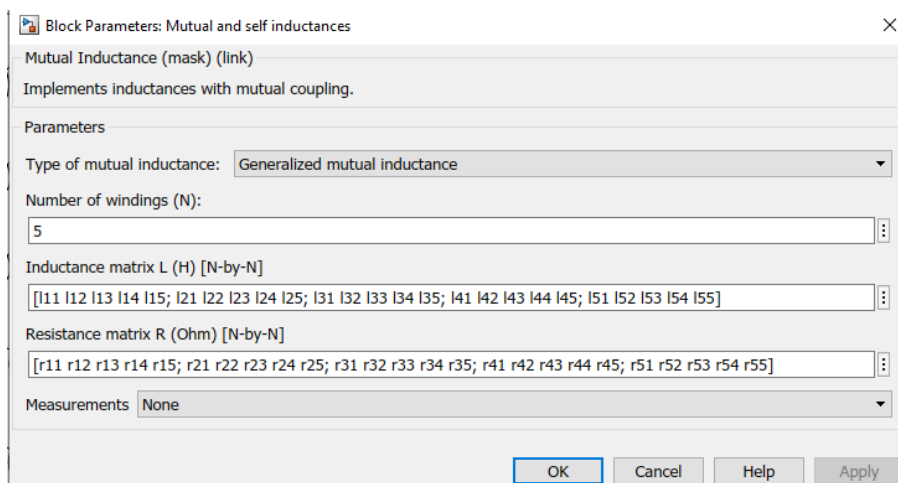


Figura 4.8 - Parâmetros da matriz de indutâncias próprias e mútuas.

Na Figura 4.9 é apresentado o bloco LEAE:

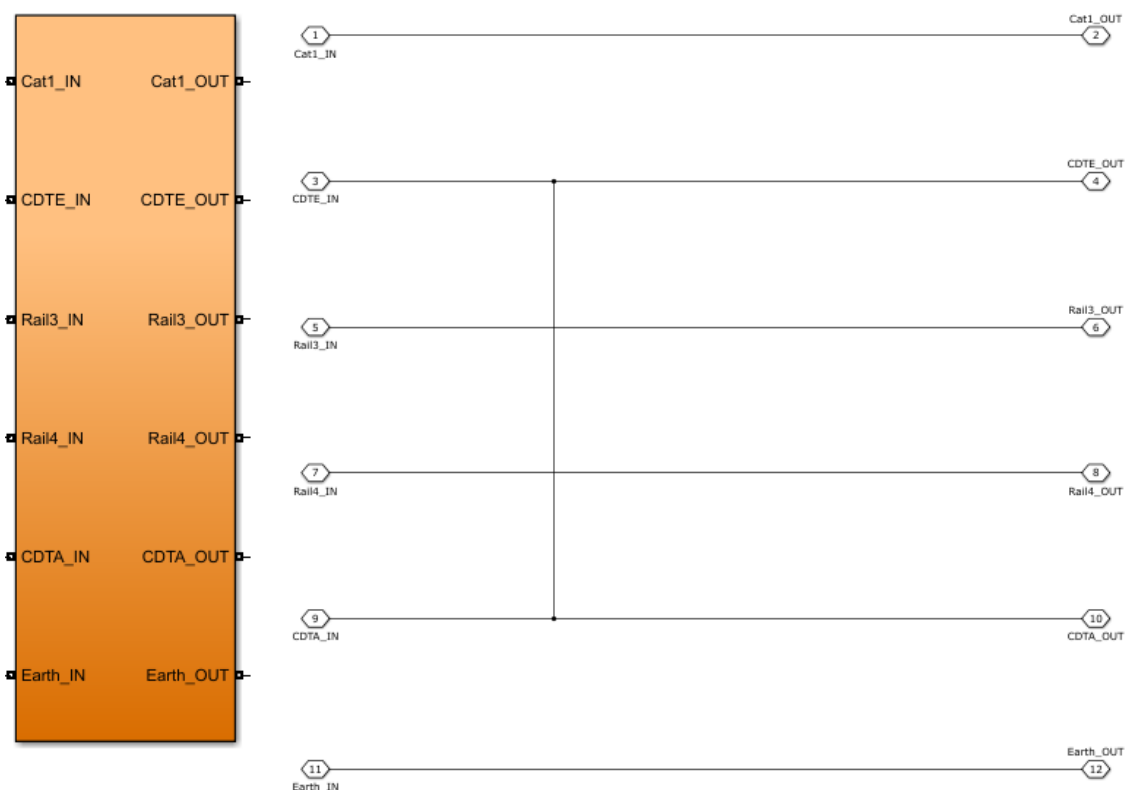


Figura 4.9 - Bloco LEAE.

Como se pode observar pela Figura 4.9, a LEAE é materializada por uma ligação equipotencial entre o CDTA e o CDTE. Normalmente este tipo de ligação recorre a cabo LXV de 50 mm² ou 70 mm² (consoante o troço onde seja aplicada). Como este cabo possui um comprimento curto, para efeitos de simulação foi desprezada a resistência introduzida por este cabo.

Na Figura 4.10 é apresentado o bloco LTI:

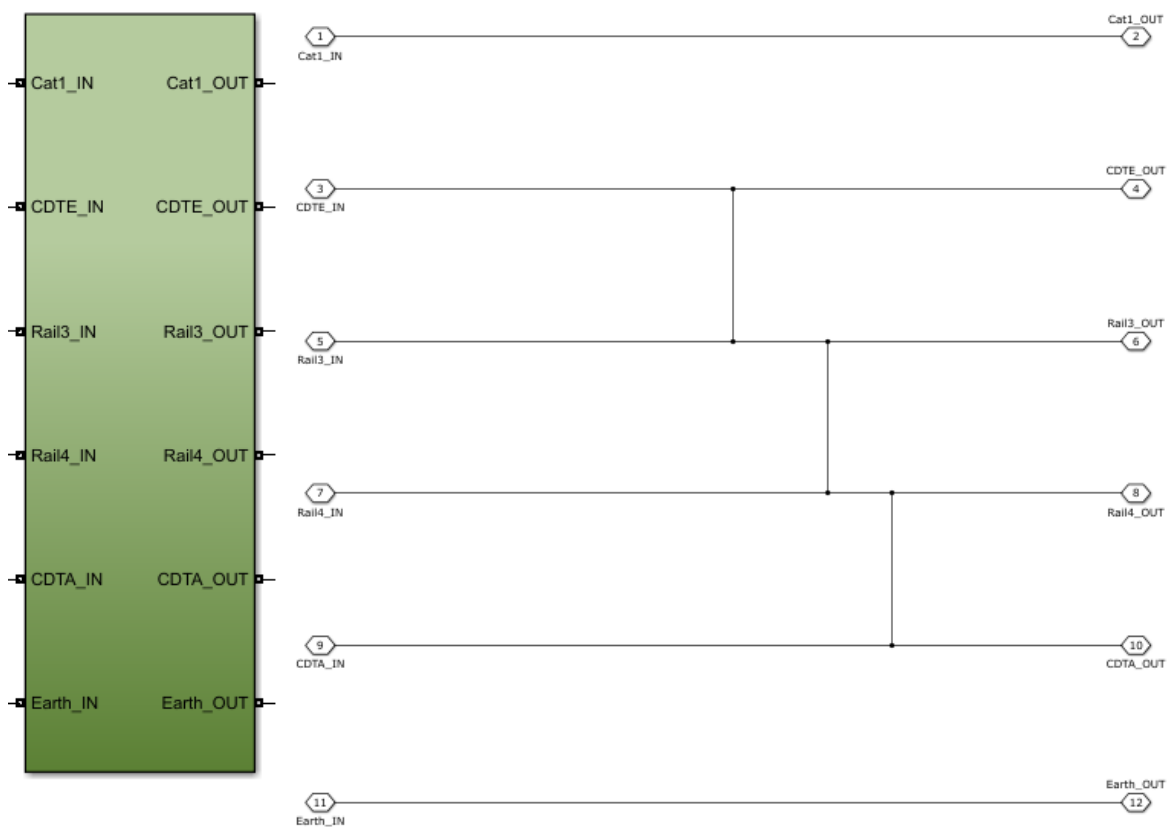


Figura 4.10 - Bloco LTI.

Como se pode observar pela Figura 4.10, a LTI é materializada por uma ligação equipotencial entre os carris, CDTA e o CDTE. Esta ligação recorre a cabo LXV de 70 mm². Como este cabo possui um comprimento curto, para efeitos de simulação foi desprezada a resistência introduzida por este cabo. Foi ainda necessário proceder à elaboração de um modelo equivalente de um comboio, por forma a se poder avaliar o comportamento da impedância vista do pantógrafo com a colocação de vários comboios elétricos em serviço. Desta forma, foi modelizado por intermédio de uma indutância equivalente [14], representativa do seu transformador de potência, obtida através dos parâmetros elétricos definidos na Tabela 3.1, cujo modelo matemático desenvolvido em *Simulink* se apresenta na Figura 4.11. Esta indutância equivalente, representa simplificada toda a dinâmica constituída pelos elementos da Figura 3.3. Importa igualmente referir que o modelo equivalente apresentado, constitui um modelo simplificado do comboio em estudo, mas que tem a vantagem de reduzir a carga computacional em simulação numérica com recurso ao *Matlab/Simulink*.

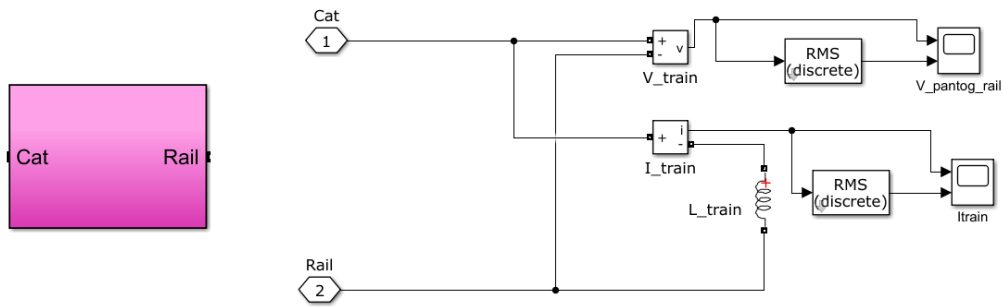


Figura 4.11 – Bloco representativo do modelo de um comboio.

4.3 Desenvolvimento do Processo de Simulação

Após a obtenção do modelo matemático a calcular e definido o layout da linha eletrificada disposto no *Simulink*, torna-se então necessário proceder à simulação para cálculo das impedâncias de ressonância. Os scripts utilizados para a implementação do modelo matemático, descrito anteriormente em 4, encontram-se dispostos no Anexo C.

Desta forma, após dado o início à simulação numérica, as seguintes mensagens irão aparecer no ecrã do utilizador, respectivamente a Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14.

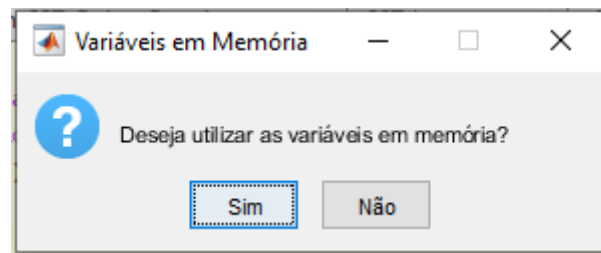


Figura 4.12 - Mensagem de Simulação.

Este “*Request user input*”(Figura 4.12) do *Matlab*, indicará ao processo de simulação se é pretendido a utilização das variáveis fixas que estejam eventualmente na memória da ferramenta *Matlab*. Caso a indicação seja “Sim” o script utilizará as variáveis em memória e caso seja indicado “Não”, duas novas janelas de requisição de inputs aparecerão para que o utilizador especifique as variáveis a tomar em consideração pelo *script* de simulação. A primeira janela (Figura 4.13) que aparecerá corresponderá aos inputs necessários para calcular as variáveis necessárias à caracterização das SST em estudo. Estas variáveis podem ser consultadas nas fichas de ensaio do transformador desta.

Inputs para cálculo do transformador da SST (valores Default)

Qual é a potência nominal da SST? (em VA):
16.2e6

Qual é a tensão do lado primário do transformador da SST? (em V):
150e3

Qual é a tensão do lado secundário do transformador da SST? (em V):
27.5e3

Qual é o valor de perdas em vazio medido (em W)?
13900

Qual é o valor da intensidade de corrente medido (em %)?
0.18

Qual é o valor da resistência dos enrolamentos do lado AT (em Ohm)?
1.44

Qual é o valor da resistência dos enrolamentos do lado BT (em Ohm)?
0.0435

Qual é o valor da tensão de curto-circuito (em %)?
9.26

Qual é o valor das perdas em curto-circuito medido (em W)?
44600

Qual é o valor da capacidade da SST (em F)?
6e-9

OK Cancel

Figura 4.13 – Inputs Transformador da SST.

A janela que irá aparecer (Figura 4.14) depois de definidos os inputs do transformador da SST, corresponde à janela dos inputs necessários para a caracterização do comboio e da caracterização dos ramais de entrega de energia por parte da REN ou EDP (consoante o caso).

Inputs para cálculo das características do Comboio e Fornecimento de Energia (Valores Defa...

Qual é o valor da tensão de operação do comboio (em V)?
25e3

Qual é o valor da corrente de operação do comboio (em A)?
65

Qual é o valor da tensão do lado do fornecedor de energia? - REN/EDP (em V)?
150e3

Qual é o valor do comprimento do cabo de entrega d SST REN/EDP? (em Km)?
35

Qual é o valor, em PU, da resistência do cabo fornecida pela REN/EDP? (em Ohm)?
0.01932

Qual é o valor de resistência do cabo (ver tipologia) por Km fornecida por um catálogo de cabos? (em Ohm)?
0.1093

Qual é o valor, em PU, da reactância do cabo fornecida pela REN/EDP? (em Ohm)?
0.06504

Locomotiva ou Automotora?:
Automotora

OK Cancel

Figura 4.14 – Inputs do comboio e ramais de entrega de energia.

Os valores constantes da Figura 4.13 e Figura 4.14 materializam os valores específicos para a SST de Quinta Grande (Figura 4.1 e Figura 4.2), sendo que os mesmos são os valores *default* que aparecerão sempre em cada nova simulação, mesmo que a SST a estudar não seja a de Quinta Grande, servindo neste caso de exemplo para que o utilizador indique os valores com o formato desejável.

Em qualquer momento, caso o utilizador clique no botão “X” ou “Cancel” das janelas, a simulação será cancelada, sendo necessário recomeçar a simulação, indicando novamente as variáveis solicitadas pelas janelas apresentadas anteriormente.

Após definidas todas as variáveis necessárias para a correta simulação do modelo matemático produzido, dar-se-á então início à simulação. Esta simulação fará um varrimento na frequência desde os 50 Hz até aos 10 kHz para a corrente injetada, definida no modelo de injeção de corrente descrito em 4.2.2 e Figura 4.5. Este varrimento na frequência está associado à frequência de comutação dos conversores e as suas múltiplas (conforme exemplificado nas Figura 3.10, Figura 3.11 e Figura 3.12). Após finalizado o varrimento na frequência, o script elabora um relatório onde coloca em formato de tabela as impedâncias resultantes em função da frequência correspondente. Como o modelo é

constituído por blocos “MTL” que corresponde a troços de via de cerca de 500 metros, torna-se necessário alterar a localização do modelo de injeção de corrente para uma nova localização do modelo, ou seja, colocando o modelo de injeção de corrente à frente de um bloco MTL sendo necessário proceder novamente à simulação das impedâncias de ressonância neste novo local, podendo desta forma caracterizar as impedâncias de ressonância de 500 em 500 metros, cobrindo desta forma praticamente todo o troço alimentado pela SST. A título de exemplo, para estes novos casos, na janela apresentada na Figura 4.12 poderia ser indicado o campo “Sim”, aumentando a rentabilidade de tempo despendido em cada simulação, pois as variáveis de entrada serão as mesmas, caso o troço a estudar seja alimentado pela mesma Subestação.

Desta forma, foram calculadas todas as impedâncias de ressonância para os troços alimentados pela SST de Quinta Grande, de 500 em 500 metros, cujos resultados serão apresentados no capítulo seguinte.

5. Resultados das Simulações Numéricas

5.1 Resultados Obtidos e Interpretação

Com base nos procedimentos expostos no capítulo 4 anterior, foram retirados os seguintes resultados através da simulação numérica:

- Impedâncias de Ressonância do trecho alimentado pela SST de Quinta Grande;
- Influência de um ou vários comboios elétricos no trecho.

Desta forma, após retirados todos os valores de impedância vistos pelo pantógrafo recorrendo à metodologia apresentada em 4, associados a cada localização de 500 em 500 metros, foi possível caracterizar o comportamento na frequência das impedâncias vistas pelo pantógrafo do trecho compreendido entre o Ponto Quilométrico (PK) 8.500 e 59.500, respetivamente entre a ZN de Muge e a ZN de Canha (Figura 4.1), o qual é apresentado na Figura 5.1. Importa igualmente referir que a SST de Quinta Grande se situa no PK 34.500.

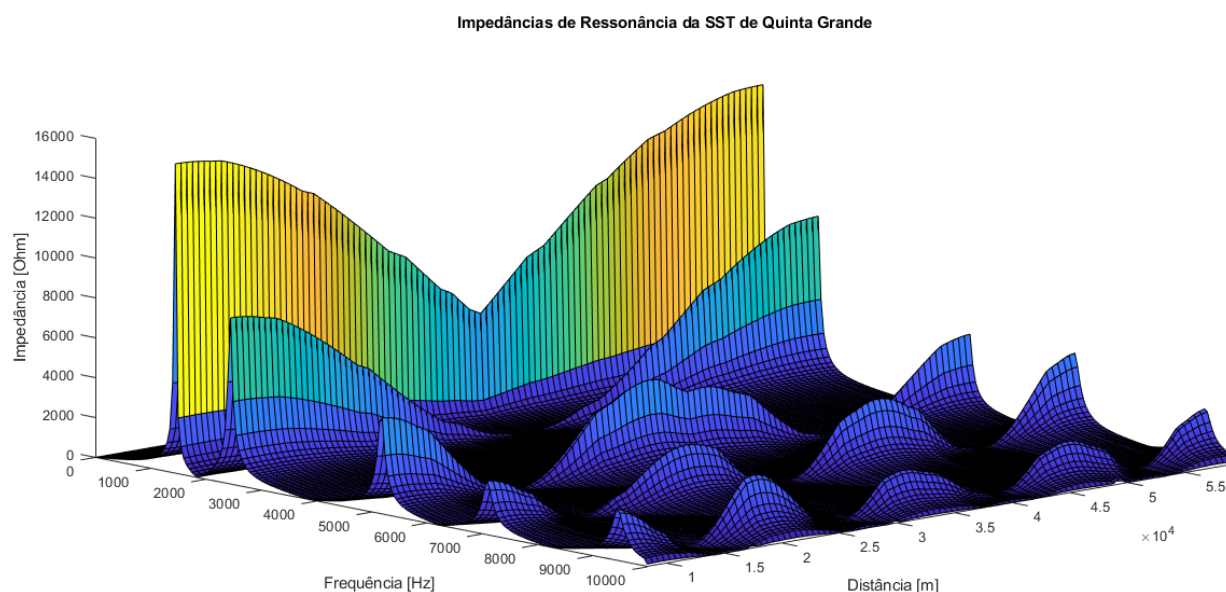


Figura 5.1 - Comportamento na frequência da impedância vista pelo pantógrafo no trecho alimentado pela Subestação de Tração de Quinta Grande.

É apresentado na Figura 5.2 o comportamento na frequência das impedâncias de vistas pelo pantógrafo na ZN de Muge, SST de Quinta Grande e ZN de Canha.

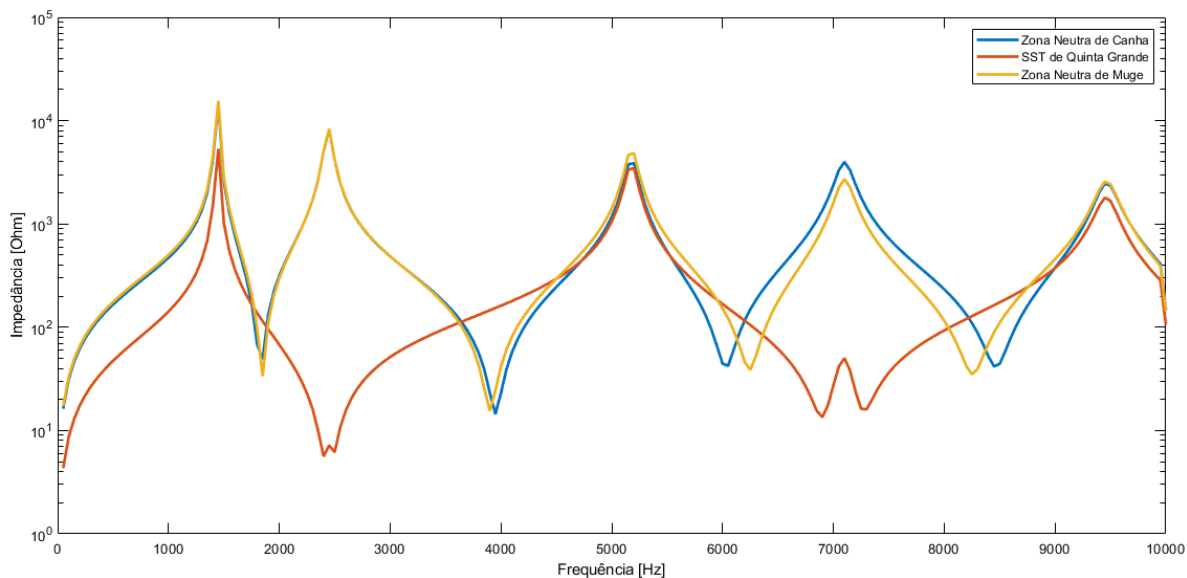


Figura 5.2 - Comportamento na frequência da impedância de vista pelo pantógrafo na ZN de Muge, SST de Quinta Grande e ZN de Canha

Analisada a Figura 5.1 e Figura 5.2 anteriores é possível caracterizar todas as frequências de ressonância calculadas para este trecho, para quais a impedância obtida foi máxima:

Tabela 5.1 - Caracterização das frequências de ressonância.

		Frequências de Ressonância [Hz]				
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
		1450	2450	5200	7150	9500
Ordem da harmónica [h]		29	49	104	143	190

Verificou-se então que as frequências para quais ocorrem os picos máximos de impedância que é vista pelo pantógrafo, depende exclusivamente da topologia e características elétricas das instalações fixas de tração elétrica.

Não obstante, o comportamento na frequência do trecho poderá ser influenciado com a quantidade e a posição de MC elétrico, pelo que foi ainda tomado em consideração o comportamento destas curvas de ressonância através da influência da presença de uma ou várias UTE a tracionar no trecho.

Todas as automotoras utilizadas nas simulações seguintes foram consideradas idênticas, representadas por uma indutância equivalente do seu transformador de potência (Figura 4.11), obtida através dos parâmetros elétricos definidos na Tabela 3.1.

Como tal, é apresentado de seguida a distribuição do material circulante ao longo da linha, a qual foi utilizada para realizar as simulações com as respetivas UTE a realizar serviço. A distribuição das UTE foi baseada na matriz de frequência da Gestão de Capacidade do troço Muge-Canha, constante do Anexo F. Foram realizadas três simulações, respetivamente apenas com UTE 1 em serviço, UTE 1 e 2 em serviço e UTE 1, 2 e 3 em serviço.

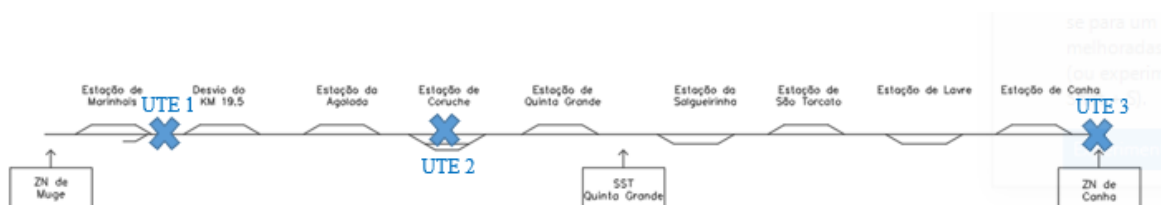


Figura 5.3 - Distribuição do Material Circulante

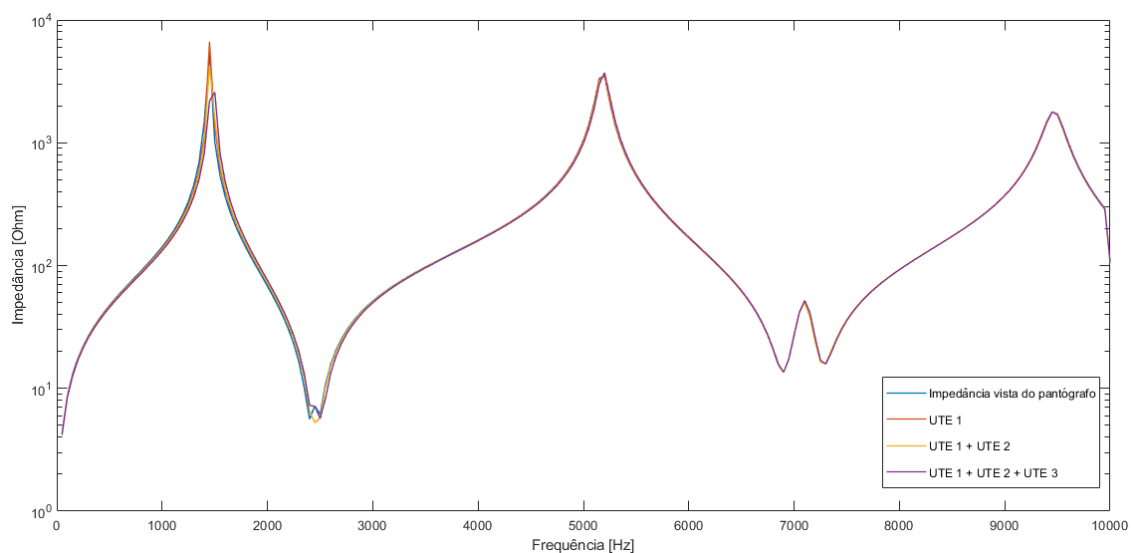


Figura 5.4 – Afetação das frequências de ressonância com UTE em serviço na zona da SST de Quinta Grande.

Conforme é possível constatar pela análise da Figura 5.4 e em comparação com a Figura 5.2, a adição de uma, duas ou três UTE de SI da série 2240, pouco afetou a impedância vista do pantógrafo na zona da SST de Quinta Grande (ponto de referência de injeção de corrente), possivelmente pelo facto da indutância equivalente não possuir um valor suficiente para que o comportamento na frequência fosse diferente, no entanto, diferentes valores de indutância representativos de MC com potência superior poderiam levar a que o comportamento na frequência calculado fosse diferente. Deste modo, os resultados obtidos permitem concluir que a influência deste tipo de material circulante UTE nas impedâncias do troço é praticamente desprezável.

5.2 Comparação com o Conteúdo Harmónico do Material Circulante

A Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7 representam ensaios CEM realizados às automotoras UTE de SI da série 2240 na Linha de Vendas Novas em 15/02/2006, onde se insere o troço alimentado pela SST de Quinta Grande.

Estas imagens foram retiradas através do método apresentado no capítulo 3 (em particular a Figura 3.3), sendo possível visualizar que as frequências de comutação dos conversores de tração utilizados nestas UTE, eram na data de 450 Hz. Este ensaio foi realizado em unidade dupla, isto é, duas automotoras UTE acopladas em série, sendo que cada unidade UTE possui dois conversores de tração a funcionar em série, em que ambas as UTE se encontravam a funcionar em regime normal, ou seja, com todos os conversores de tração a funcionar.

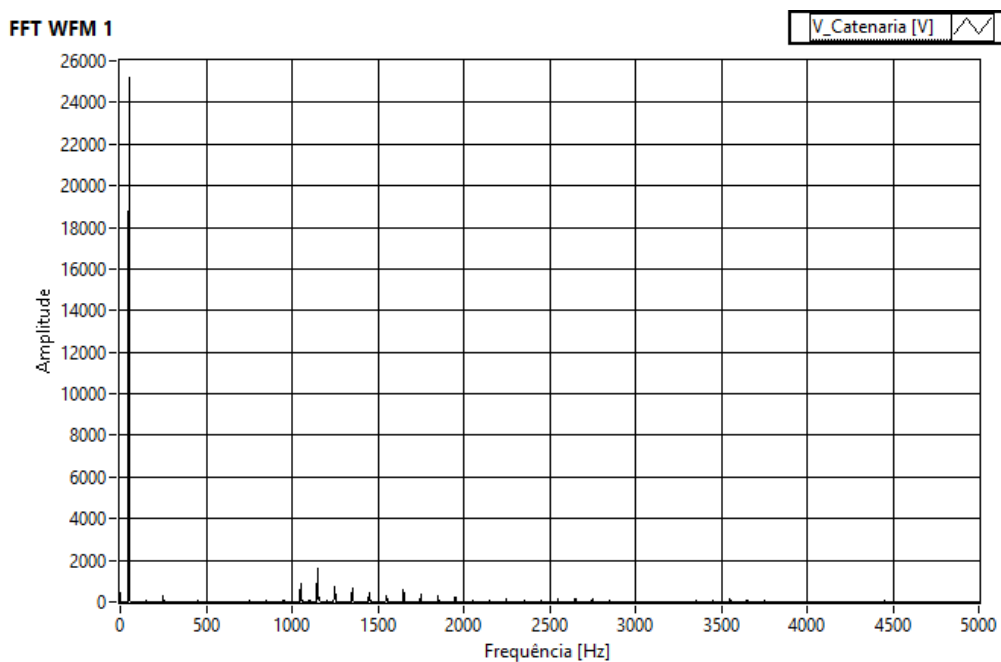


Figura 5.5 - Espectro da tensão medido.

Conforme é possível visualizar através da Figura 5.5, o espectro da tensão resultante da análise FFT indica-nos que a componente fundamental dos 50 Hz se situava na ordem dos 25 kV, estando em concordância com o valor de tensão da catenária do presente troço. É possível visualizar ainda que entre 1 kHz e 2 kHz, existe conteúdo harmónico que possui valores de tensão de até 1800 V. Estes valores estão então associados ao funcionamento dos conversores de tração das UTE de SI da série 2240, em que as frequências de comutação de cada braço destes é de 450 Hz.

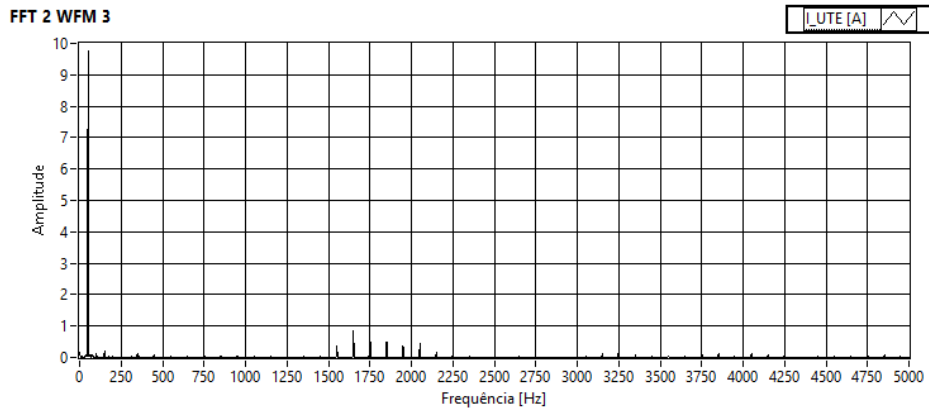


Figura 5.6 - Espectro da corrente medido na unidade motora 1.

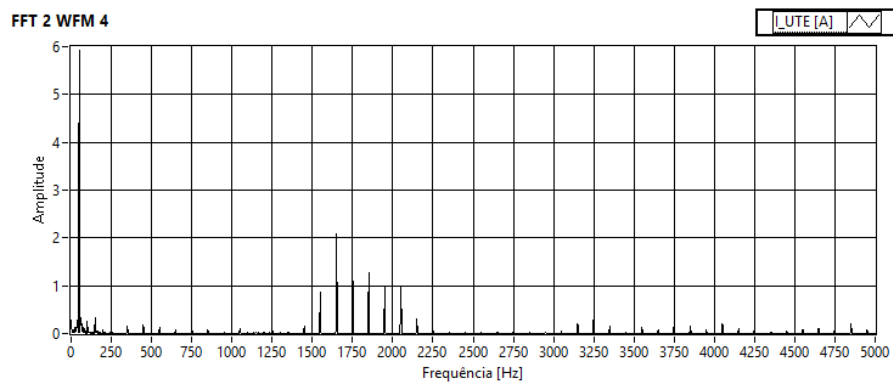


Figura 5.7 - Espectro da corrente medido na unidade motora 2.

Analisadas as figuras anteriores é possível confirmar que a frequência de comutação dos conversores de tração, à data da realização do ensaio, era de 450 Hz, pois cada unidade motora possui dois conjuntos de conversores que se encontram ligados em paralelo, de tal forma que a série de conversores de tração e a série de unidade resulta numa frequência de operação de 1800 Hz, sendo que o seu conteúdo harmónico se situa nas harmónicas ímpares imediatamente à sua volta.

Tomando igualmente em consideração a Tabela 3.2 apresentada no capítulo 2.3.3, é possível caracterizar as frequências de comutação dos conversores de tração das automotoras UTE de SI da série 2240 representados na Tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Conteúdo harmônico dos conversores de tração das UTE de SI da série 2240.

Conteúdo harmônico UTE			
Frequência de Comutação [Hz]	Unidade	Frequência de comutação de cada braço do conversor [Hz]	Frequência de operação [Hz] ± 50 Hz
450	1	450	900
	2		1800
	3		2700
	4		3600
	5		4500
	6		5400
650	1	650	1300
	2		2600
	3		3900
	4		5200
	5		6500
	6		7800

Comparando agora com as frequências de ressonância da impedância vista pelo pantógrafo obtidas para o troço alimentado pela SST de Quinta Grande, é possível constatar que as frequências de comutação dos conversores de tração a 650 Hz poderão entrar em conflito com as frequências de ressonância do troço alimentado pela SST de Quinta Grande, caso existam circulações UTE a circular em unidade simples ou unidade dupla, pois existem harmônicas que são coincidentes, nomeadamente a harmónica 29, harmónica 49 e a harmónica 104, ou seja, nas frequências de 1450 Hz, 2450 Hz e 5200 Hz podendo neste caso provocar incidentes quer na eletrónica de potência a bordo destas UTE, quer ao nível da Subestação.

6. Conclusões

6.1 Conclusões Gerais

Analisado o trabalho desenvolvido no âmbito do presente documento, pode afirmar-se que o principal objetivo desta dissertação foi cumprido. Foi criada uma ferramenta de cálculo numérico que demonstrou ser capaz de realizar o estudo e demonstração das frequências de ressonância para uma via ferroviária, eletrificada a 25 kV a 50 Hz alimentado por uma SST de tração, bem como é capaz de avaliar a influência de unidades motoras no comportamento na frequência do respetivo troço.

Para o troço alvo do presente estudo foi determinado que as frequências de ressonância, ou seja, frequências para quais a impedância calculada através da ferramenta desenvolvida é máxima são definidas pela seguinte tabela:

Tabela 6.1 - Resumo geral dos resultados obtidos para as frequências de ressonância

	Frequências de Ressonância [Hz]				
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	4 ^a	5 ^a
	1450	2450	5200	7150	9500
Ordem da harmónica [h]	29	49	104	143	190
Valor de impedância máximo calculado [Ω]	15517	8342	4831	3312	2893

Os valores máximos de impedância obtidos localizam-se essencialmente nos pontos extremos do troço alimentado pela SST de Quinta Grande, o que permite concluir que o troço está sujeito a impedâncias máximas, quanto mais distante for realizada a medição de impedância vista pelo pantógrafo, resultante dos parâmetros resistivos e indutivos que possuem valores superiores face à sua ligação em série.

A introdução de MC com características equivalentes a uma UTE SI 2240 no troço não introduziu qualquer alteração ao comportamento na frequência do troço eletrificado, conforme demonstrado na Figura 5.4, pelo que será necessário avaliar para outras tipologias de MC mais potente que estas UTE SI 2240.

O desenvolvimento da ferramenta em *LabVIEW* permitiu transformar os dados armazenados em fita magnética em formato digital. Esta ferramenta foi indispensável à caracterização das frequências de operação das UTE SI 2240, caracterizadas na Tabela 5.2. Com estas frequências de operação dos conversores de tração das UTE SI 2240, foi possível obter o conteúdo harmónico produzido por estes a atestada a compatibilidade com o comportamento na frequência do troço alimentado pela SST de Quinta Grande.

Analisados os dados de conteúdo harmónico deste MC com as frequências de ressonância do troço, constata-se que poderão existir interferências entre MC-Infraestrutura eléctrica nas frequências de 1450 Hz, 2450 Hz e 5200 Hz, ou seja, quando as UTE circularem em unidade simples ou dupla (com 1, 2 ou 4 conversores de tração em funcionamento).

A ferramenta desenvolvida em *LabVIEW* poderá ser utilizada no futuro em ensaios CEM da IP, destinados a caracterizar outro tipo de MC.

Desta forma, a ferramenta matemática elaborada em *Matlab/Simulink*, permite realizar a caracterização das frequências de ressonância das SST de tração eléctricas na RFN para instalações 25 kV a 50 Hz e, comparando com conteúdo harmónico produzido pelos conversores de tração do material circulante eléctrico a operar em Portugal, é possível traçar um mapa de interoperabilidade deste MC com as infraestruturas fixas de tração eléctrica existente na RFN. Esta caracterização na frequência dos troços alimentados eletricamente a 25 kV 50 Hz assume um estudo ainda mais relevante se considerarmos a interoperabilidade entre países da UE, onde o MC Europeu poderá realizar serviço em Portugal, bastando para o efeito caraterizar essas automotoras ou locomotivas, concluindo apenas à sua compatibilidade nos troços eletrificados onde pretende realizar serviço.

6.2 Desenvolvimentos a Realizar no Futuro

Importa referir que o principal objetivo desta dissertação era criar uma ferramenta com capacidade de calcular as frequências de ressonância de um dado troço, pelo que a realização desta dissertação de mestrado permitiu construir esta ferramenta indispensável e fiável para o cálculo das curvas de ressonância das Subestações de corrente alternada 25 kV a 50 Hz. Permitiu ainda concluir sobre as frequências de comutação associadas aos conversores de tração de um designado tipo de material circulante que opera atualmente em Portugal. Desta forma, poderão ser considerados os seguintes trabalhos adicionais a realizar no futuro:

- Generalização do modelo da subestação, podendo servir para troços alimentados com uma subestação ligada em “V” ou “Bifásica”;
- Generalização do modelo matemático para cálculo em vias duplas ou múltiplas em vias eletrificadas a 25 kV a 50 Hz e para sistemas de eletrificação 2 x 25 kV a 50 Hz;
- Construir modelos matemáticos aproximados por completos em *Matlab/Simulink* do material circulante elétrico (retificador, ondulator e motor AC);
- Realização de ensaios de terreno de injeção de corrente nas infraestruturas fixas de tração elétrica para confirmação dos resultados teóricos das simulações das curvas de Ressonância de uma determinada SST;
- Caracterizar as frequências de comutação dos conversores de tração dos vários tipos de material circulante elétrico a operar em Portugal/União Europeia;
- Realizar ensaios experimentais no terreno para verificação e comparação com os resultados teóricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Infraestruturas de Portugal, “Diretório da Rede 2021,” 2019.
- [2] REFER EP ENGENHARIA, “EMU SILICIO - Series 2200,” 2008.
- [3] REFER, “Energia de Tração para Técnicos de Segurança”.
- [4] Infraestruturas de Portugal, “Instrução de Exploração Técnica Nº 77 - Normas e Procedimentos de Segurança em Trabalhos na Infra-estrutura Ferroviária - Módulo de Energia de Tração,” 2009.
- [5] Infraestruturas de Portugal, “IT.ENT.003 - Esquemas Elétricos de Princípio e Encravamentos nas Subestações,” 18 04 2012.
- [6] K. Roger, J. M. Allenbach, P. Chapas, M. Comte, "Traction Électrique", vol. 1; 2, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes; ISBN 978-2-88074-674-2.
- [7] CENELEC, “EN 50163 Railway applications – Supply voltages of traction systems,” 2004.
- [8] GR.IT.GER.009, “Compatibilidade do Material Circulante com a Infraestrutura de Via Larga,” IP, 2020.
- [9] A. Ogunsola, A. Mariscotti, *Electromagnetic Compatibility in Railways, Analysis and Management*, Springer, ISBN 978-3-642-30280-0, 2013.
- [10] M. Meyer, A. J. Petersen, “Handling Large Railway Supply Systems - A Challenge for System Modelling and a Need to Guarantee Rail Vehicle’s System Compatibility,” *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, vol. 6, 14-16 October 1998.
- [11] A. Mariscotti, P. Pozzobon, “Synthesis of Line Impedance Expressions for Railway Traction Systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2 March 2003.
- [12] J. Holtz, H. J. Klein, “The Propagation of Harmonic Currents Generated by Inverter-Fed Locomotives in the Distributed Overhead Supply System,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2 April 1989.
- [13] C. Stackler, F. Morel, P. Ladoux, P. Dworakowski, “25 kV - 50 Hz Railway Supply Modelling for medium frequencies (0 - 5 kHz)”. *2016 International Conference on Electrical Systems for*

Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC).

- [14] H. Simões, “Caracterização Harmónica de Redes de Alimentação Ferroviária,” Dezembro 2012.
- [15] Infraestruturas de Portugal, “GR.IT.GER.002 - Retorno de Correntes de Tração, Terras e Proteções”.
- [16] P. Ferrari, P. Pozzobon, “Railway Lines Models for Impedance Evaluation”. *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power*.
- [17] R. P. Clayton, “Analysis of Multiconductor Transmission Lines”, vol. Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 978-0-470-13154-1.
- [18] A. Dolara, S. Leva, “Calculation of Rail Internal Impedance by Using Finite Elements,” *International Journal of Vehicular Technology*, 20 November 2009.
- [19] International Telecommunication Union, “Recommendation ITU-T K.104 - Method for identifying the transfer potential of the earth potential rise from high or medium voltage networks to the earthing system or neutral of low voltage networks,” p. 8, 03/2015.
- [20] H. Hu, Y. Shao, L. Tang, J. Ma, Z. He, “Overview of Harmonic and Resonance in Railway Electrification Systems,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, 10 March 2018.
- [21] CP, “CP, Comboios de Portugal,” [Online]. Available: <https://www.cp.pt/institucional/pt/cultura-ferroviaria/frota-material-circulante/material-2241-2297>. [Acedido em 12 08 2020].
- [22] RailFan Europe , “CP-UVIR locomotives and shunters,” [Online]. Available: http://www.railfaneurope.net/list/portugal/portugal_cp-uvir.html. [Acedido em 12 08 2020].
- [23] CENELEC, “EN 50121-3-2 - Railways applications - Electromagnetic compatibility - Part 3-2: Rolling stock - Apparatus,” 2015.

Anexo A.

Conteúdo Harmónico dos Transformadores de Tração
das UTE de SI da Série 2240

Local:	Subestação do Entroncamento
Data:	08/05/2006
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	450

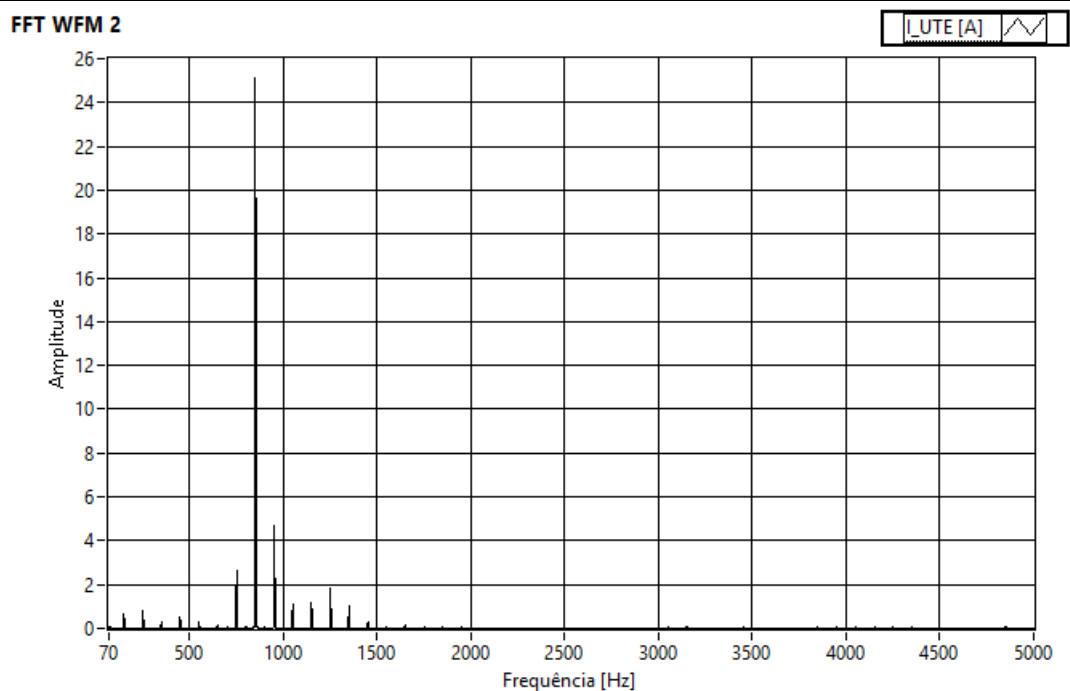


Figura A.1 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1

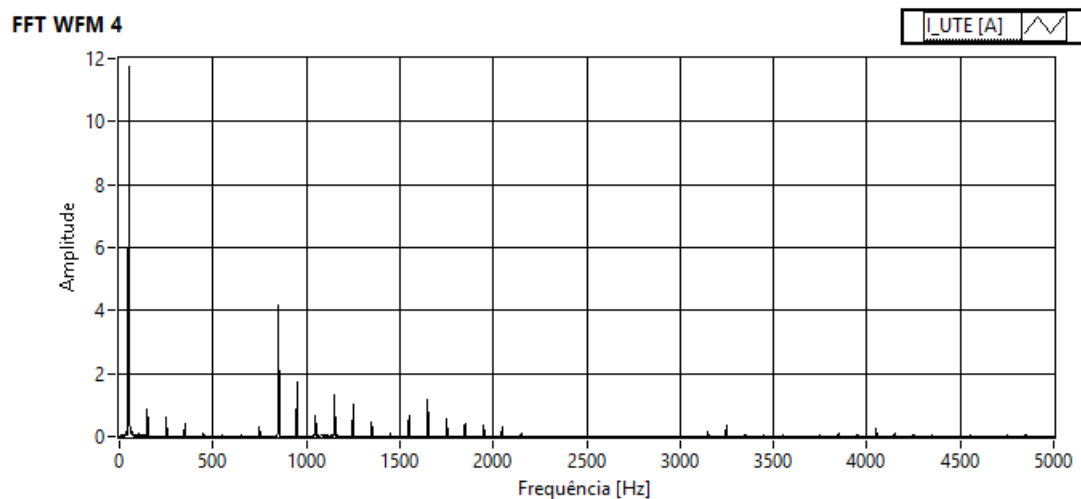


Figura A.2 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2

Local:	Linha de Vendas Novas
Data:	15/02/2006
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	450

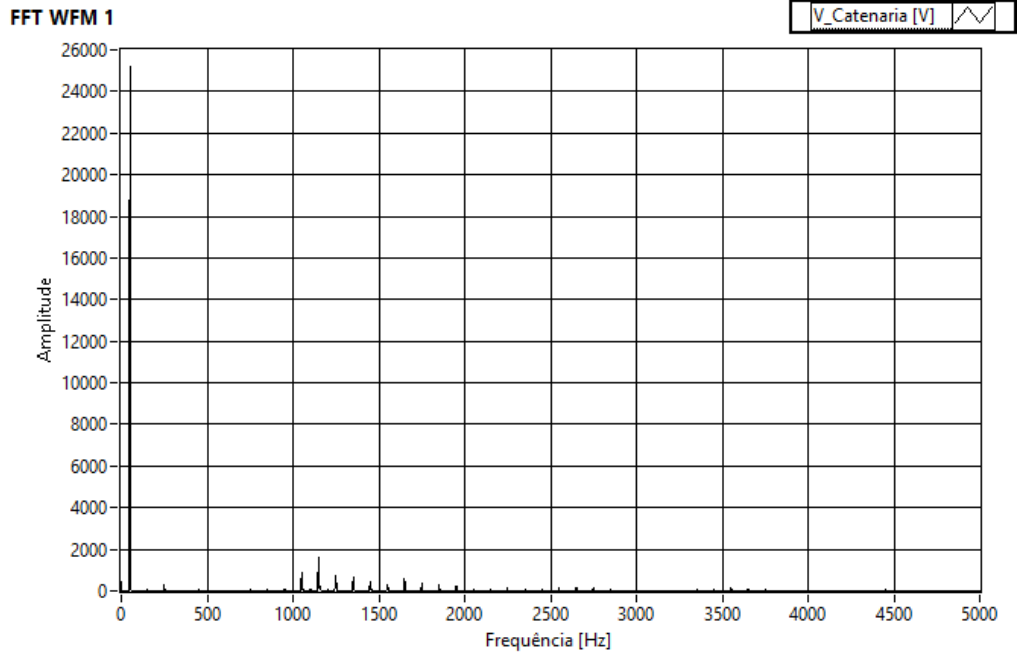


Figura A.3 - Espectro da Tensão da Catenária medida

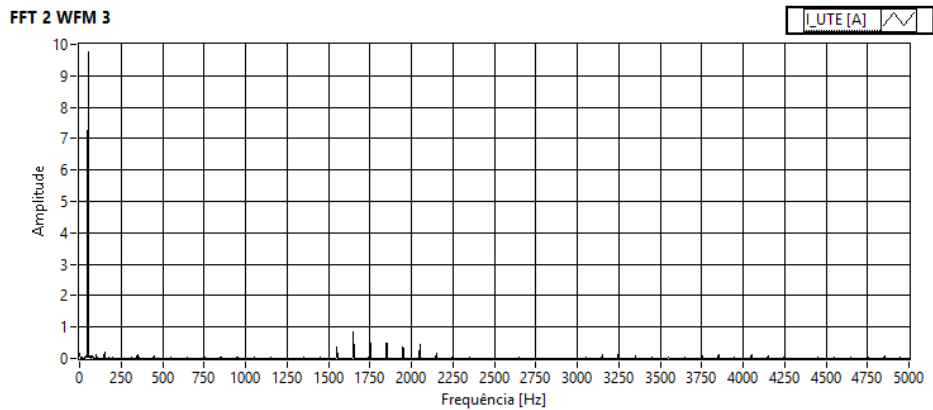


Figura A.4 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1

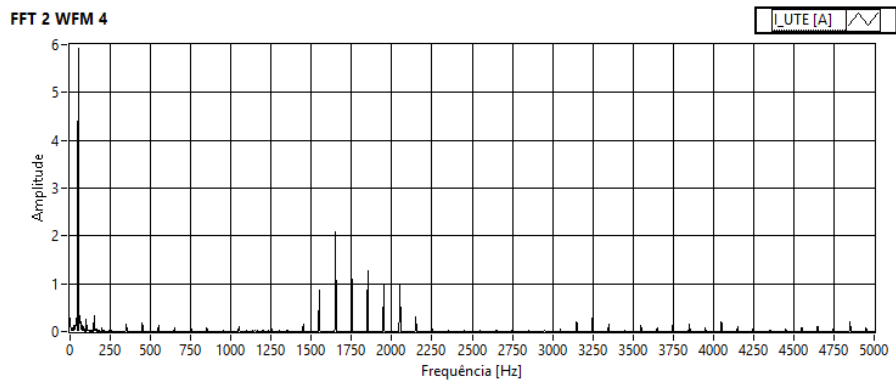


Figura A.5 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2

Local:	Subestação do Entroncamento
Data:	23/11/2005
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	450

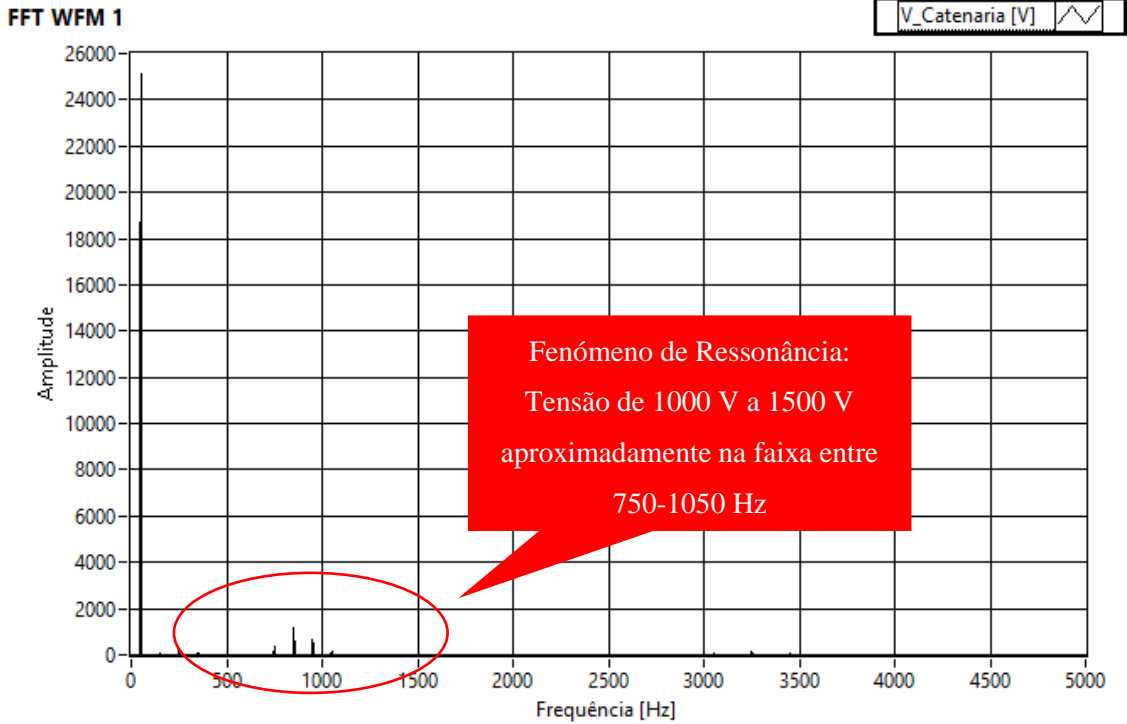


Figura A.6 - Espectro da Tensão da Catenária medida

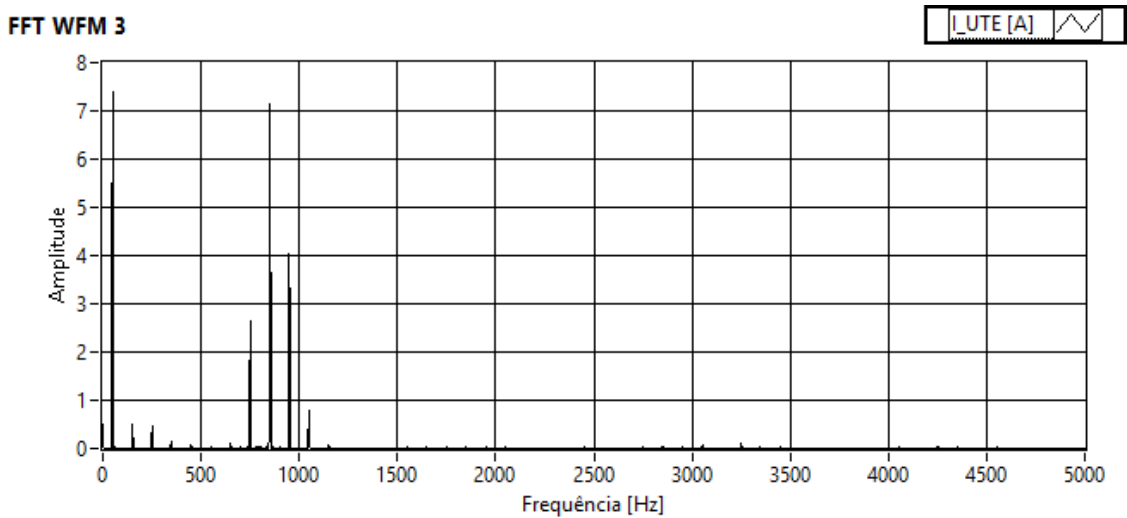


Figura A.7 - Espectro da Corrente Medida na Unidade Motora 1

Local:	Subestação de Salreu
Data:	10/02/2008
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	650

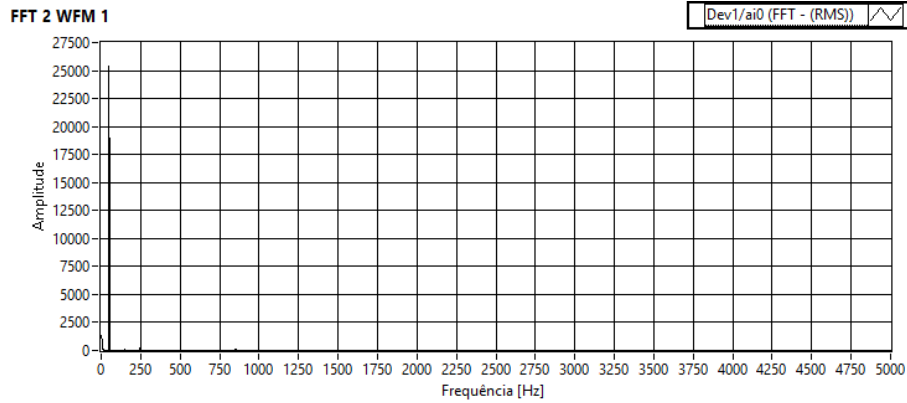


Figura A.8 - Espectro da Tensão da Catenária Medida

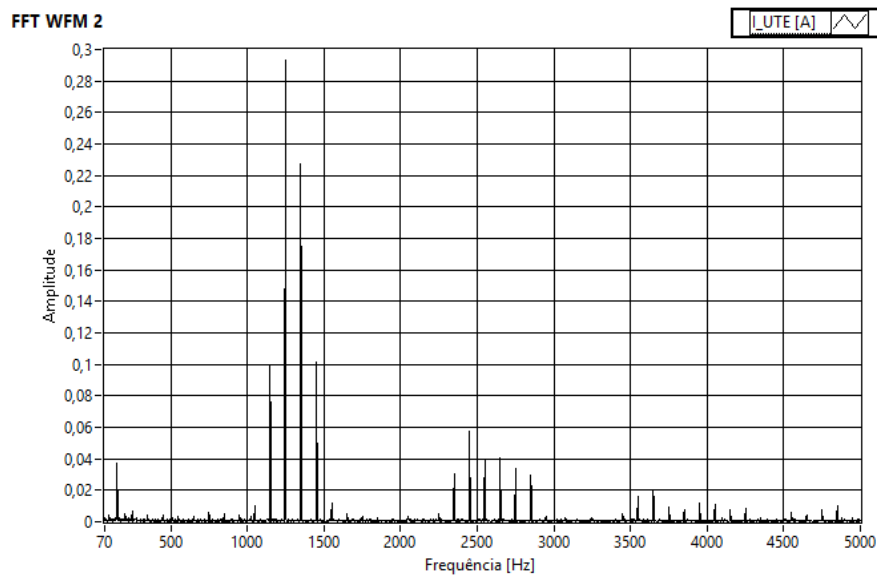


Figura A.9 - Espectro da Corrente da Unidade Motora 1

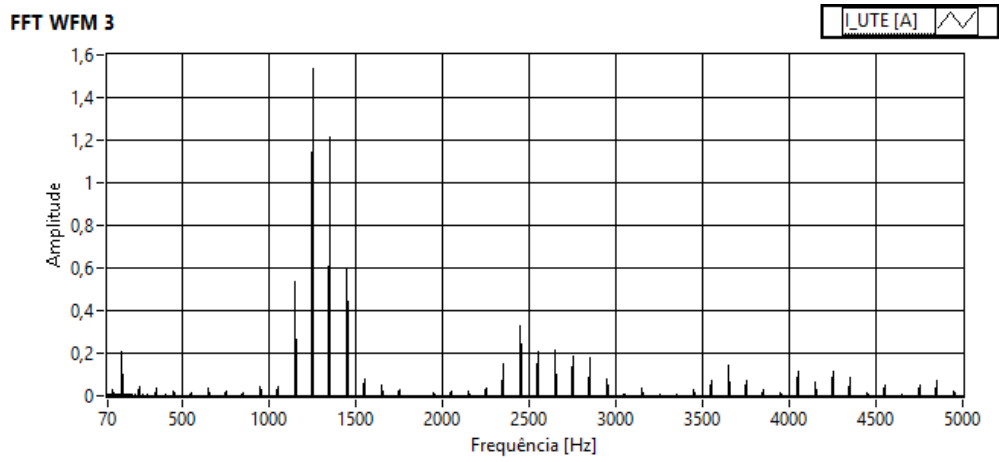


Figura A.10 - Espectro da Corrente da Unidade Motora 2

Local:	Entroncamento
Data:	14/10/2005
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	450

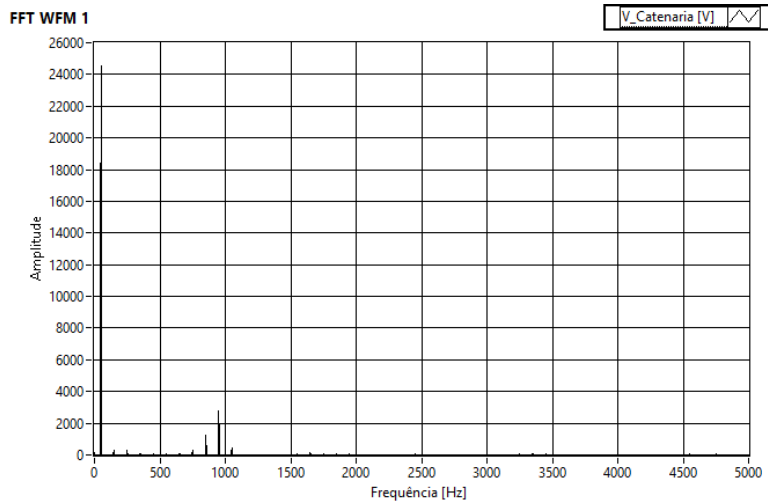


Figura A.11 - Espectro da Tensão da Catenária Medida

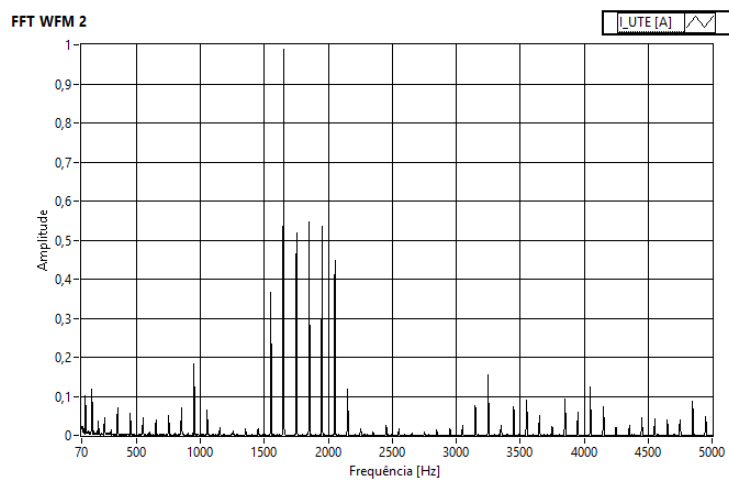


Figura A.12 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1

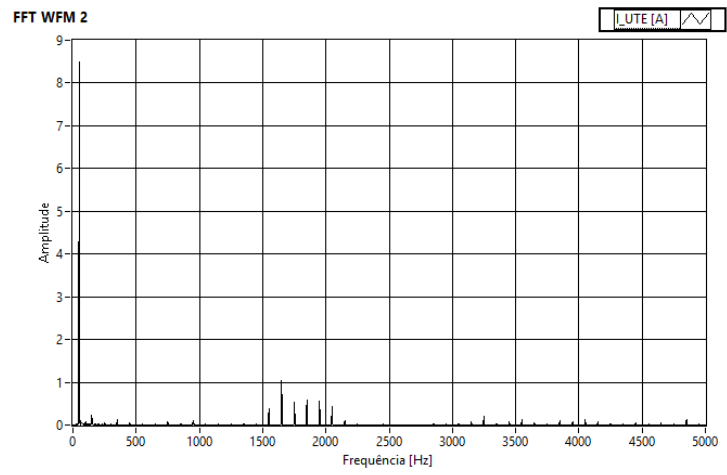


Figura A.13 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2

Local:	Portela
Data:	02/04/2006
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	650

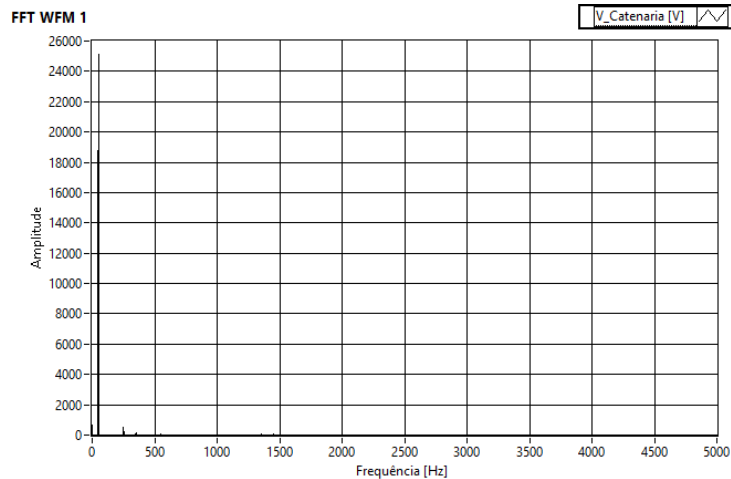


Figura A.14 - Espectro da Tensão da Catenária Medida

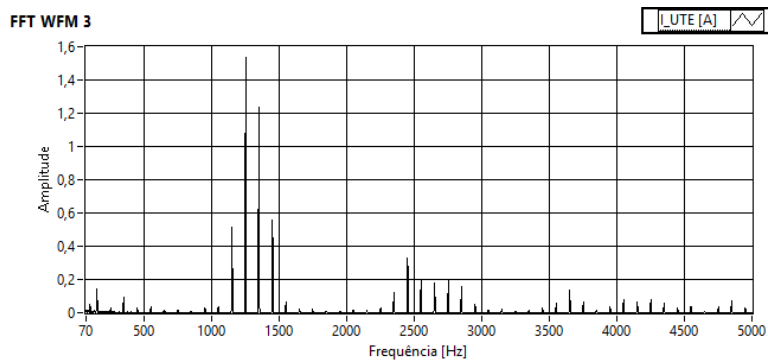


Figura A.15 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1

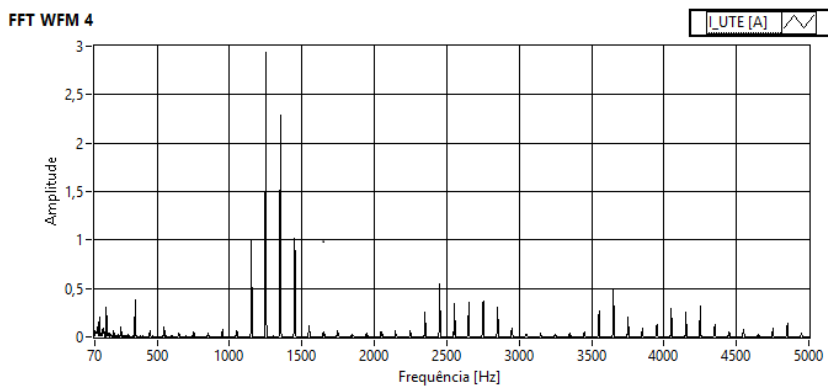


Figura A.16 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2

Local:	Zona Suburbana do Porto
Data:	03/03/2007
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	650

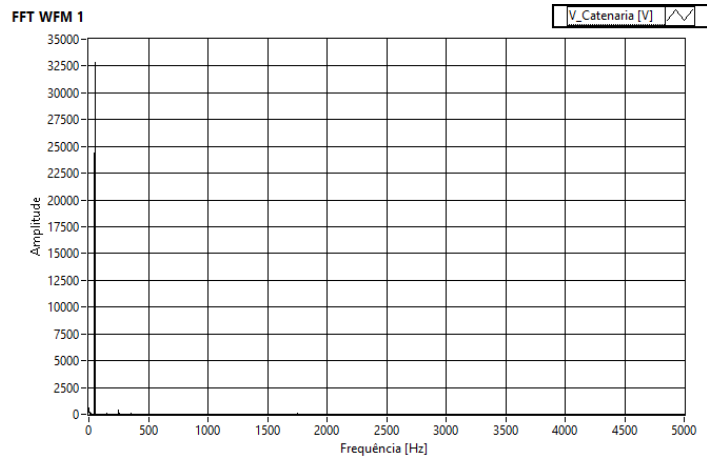


Figura A.17 - Espectro da Tensão da Catenária medida - Gravação 1

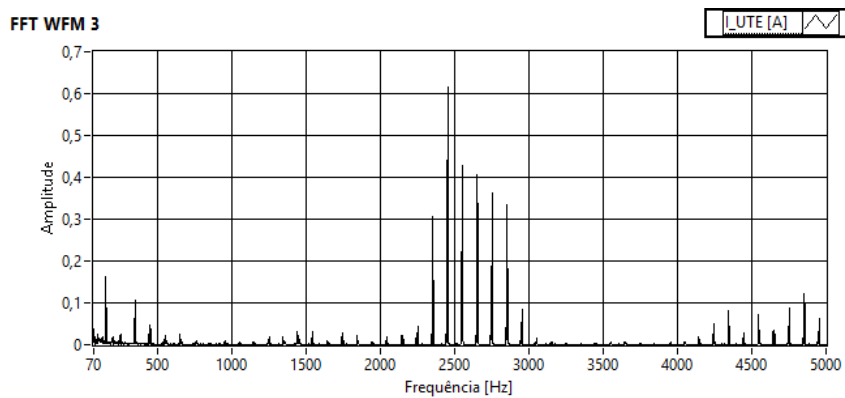


Figura A.18 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1 - Gravação 1

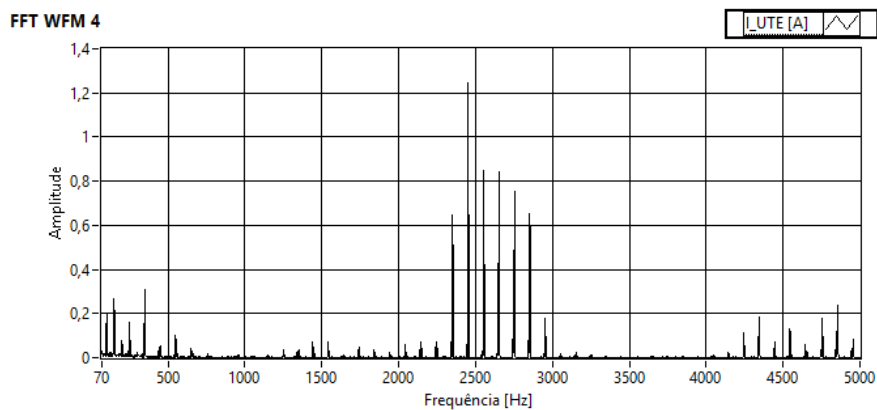


Figura A.19 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2 - Gravação 2

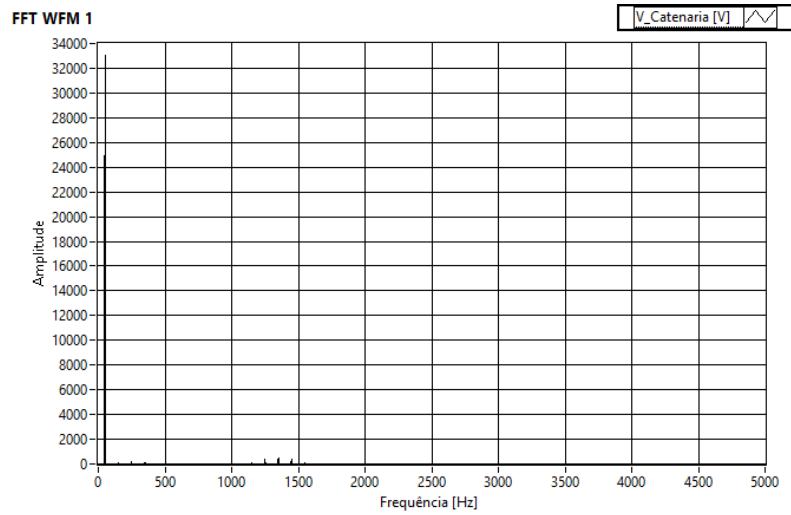


Figura A.20 - Espectro da Tensão da Catenária Medido - Gravação 2

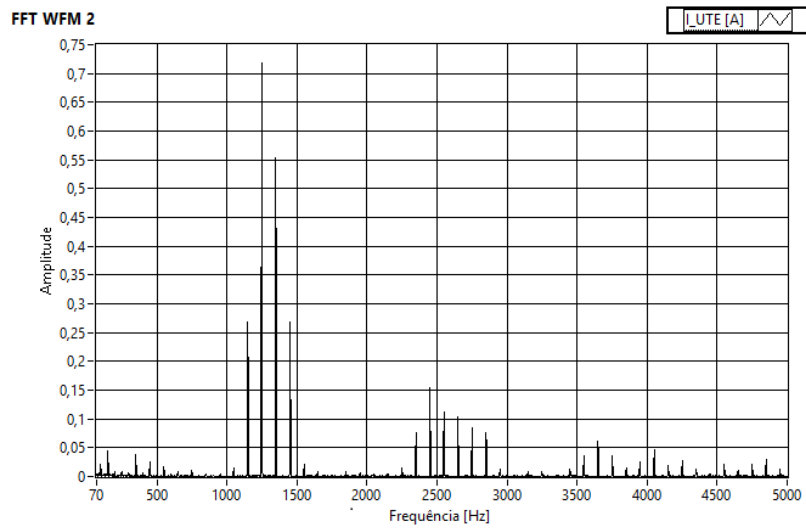


Figura A.21 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1 - Gravação 2

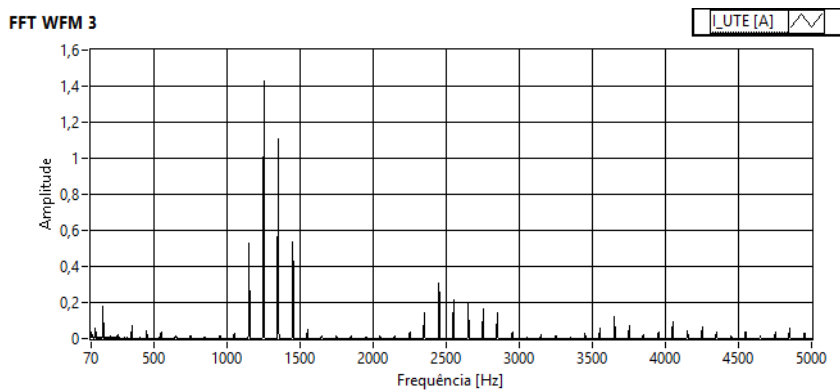


Figura A.22 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2 - Gravação 2

Local:	Alvito
Data:	19/02/2006
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	650

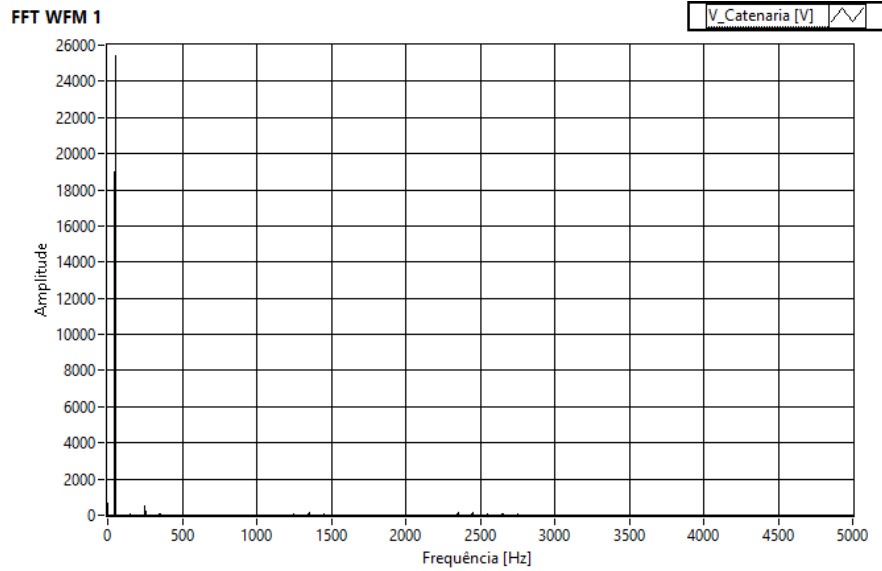


Figura A.23 - Espectro da Tensão da Catenária medido – Gravação 1

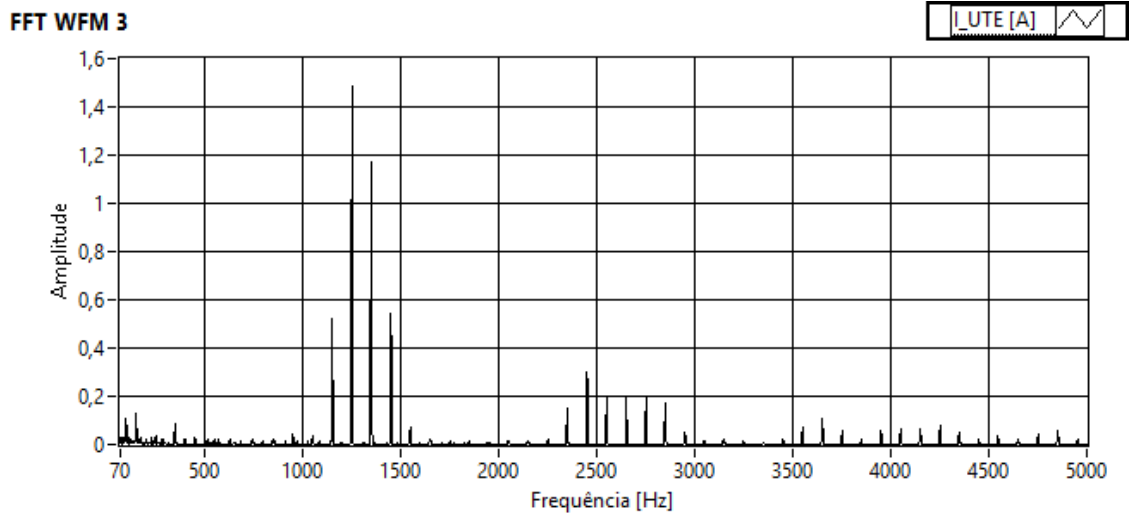


Figura A.24 - Espectro da Corrente na Unidade Motora - Gravação 1

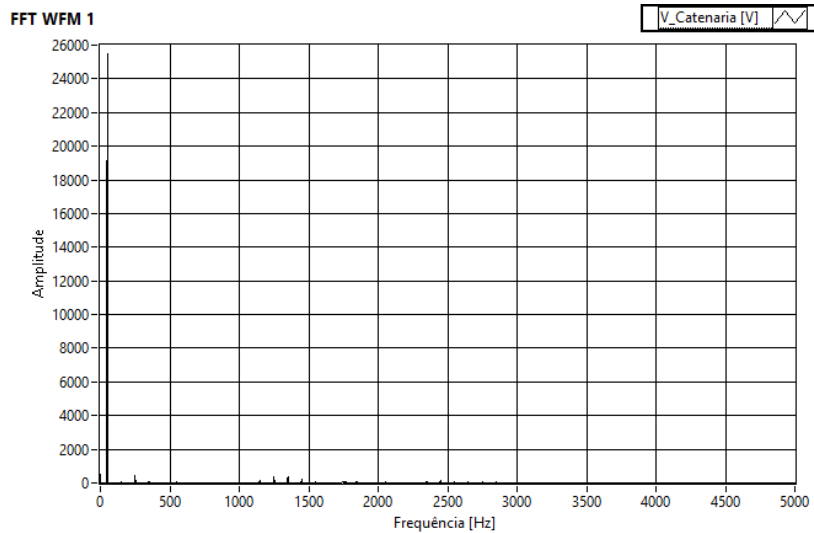


Figura A.25 - Espectro da Tensão da Catenária medido – Gravação 2

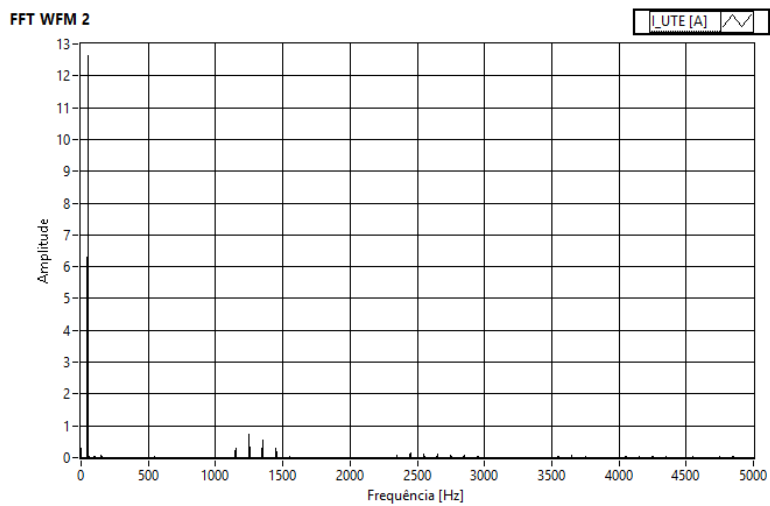


Figura A.26 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1

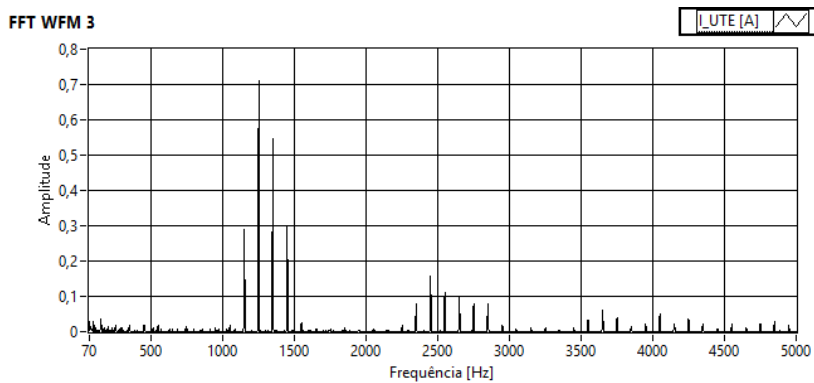


Figura A.27 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2

Local:	Belver
Data:	03/03/2006
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	650

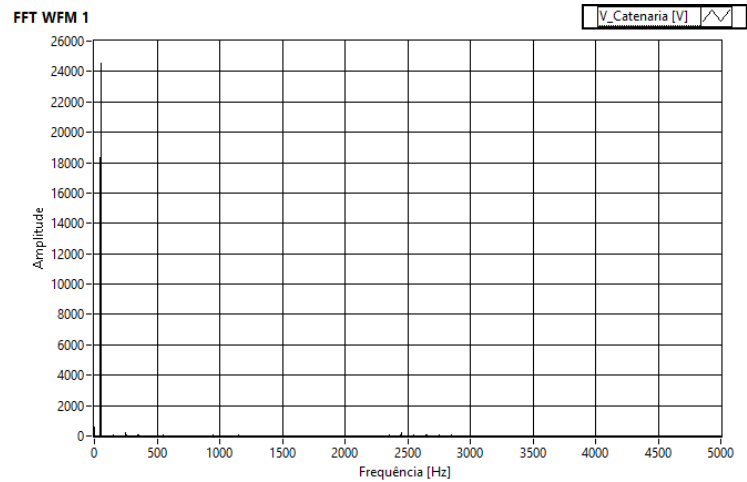


Figura A.28 - Espectro da Tensão da Catenária medido

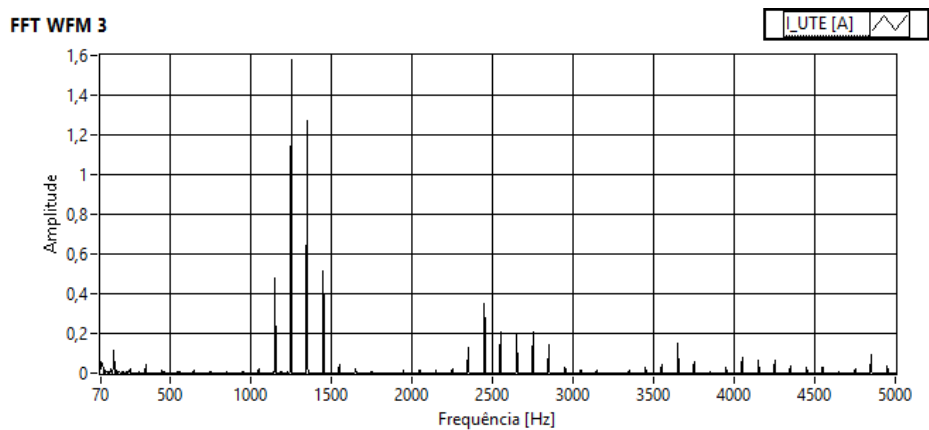


Figura A.29 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1

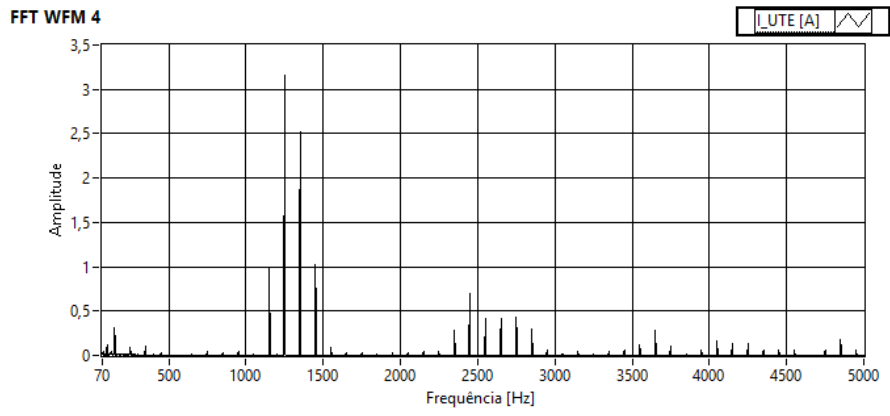


Figura A.30 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2

Local:	Marinhais
Data:	29/03/2006
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	650

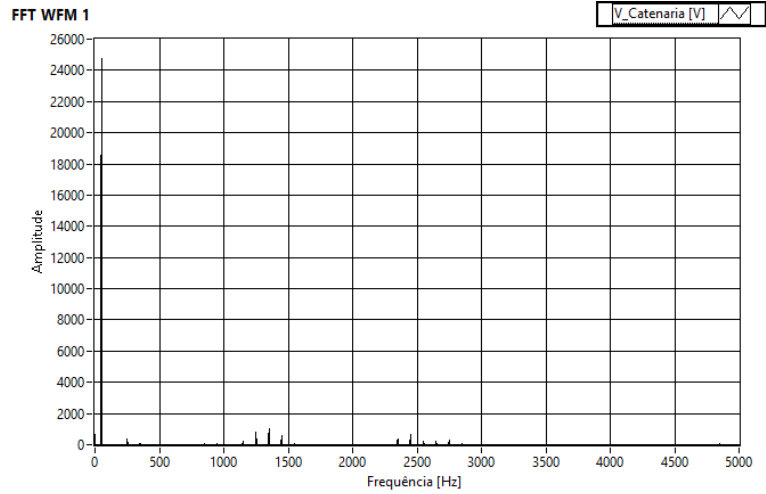


Figura A.31 - Espectro da Tensão da Catenária medido

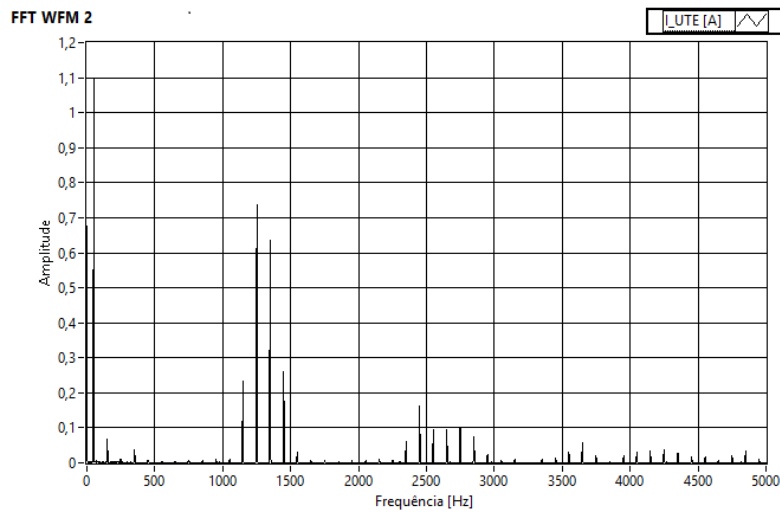


Figura A.32 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1

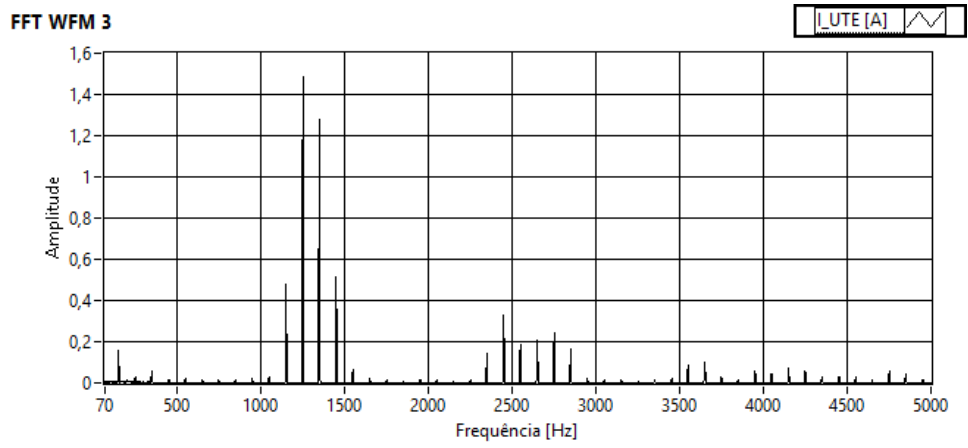


Figura A.33 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2

Local:	Entroncamento
Data:	30/11/2005
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	450

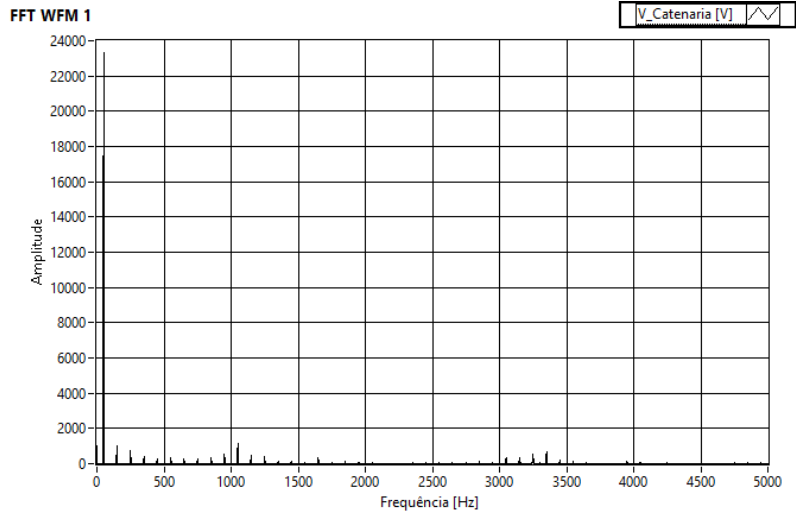


Figura A.34 - Espectro da Tensão da Catenária Medido

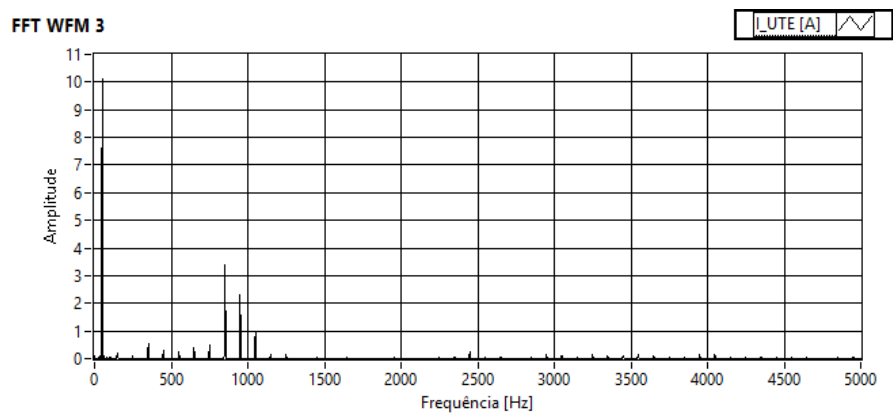


Figura A.35 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1

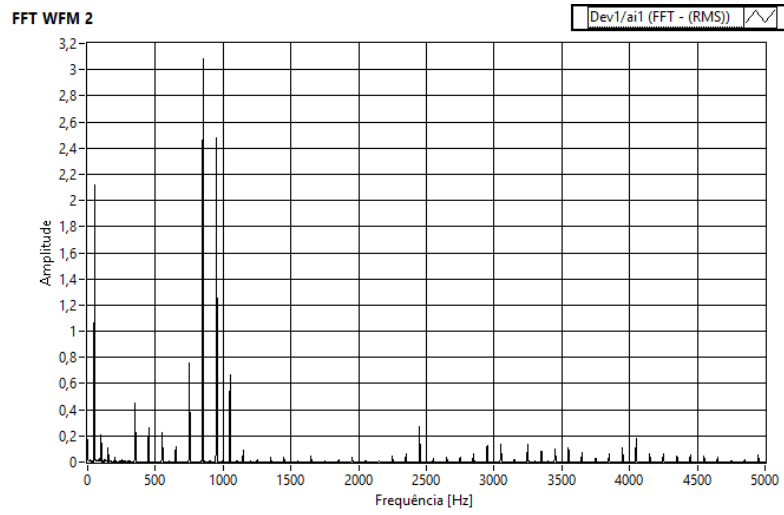


Figura A.36 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2

Local:	Poçoirão – Bombel
Data:	07/11/2007
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	650

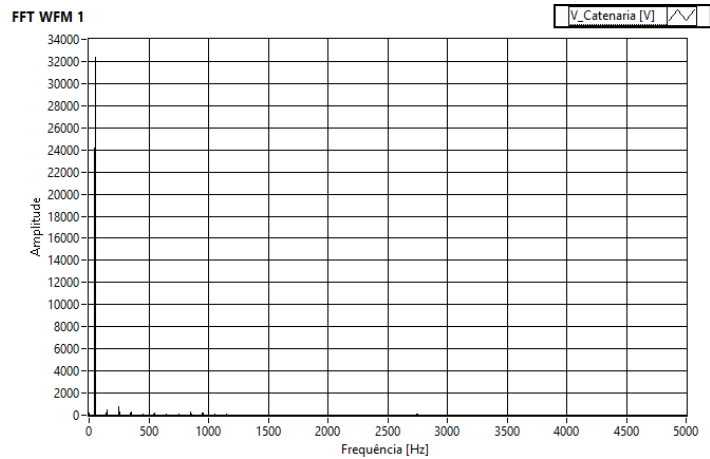


Figura A.37 - Espectro da Tensão da Catenária medido - Gravação 1

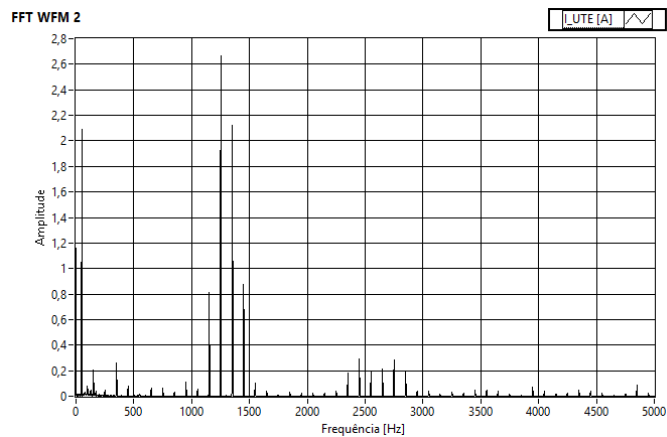


Figura A.38 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1 - Gravação 1

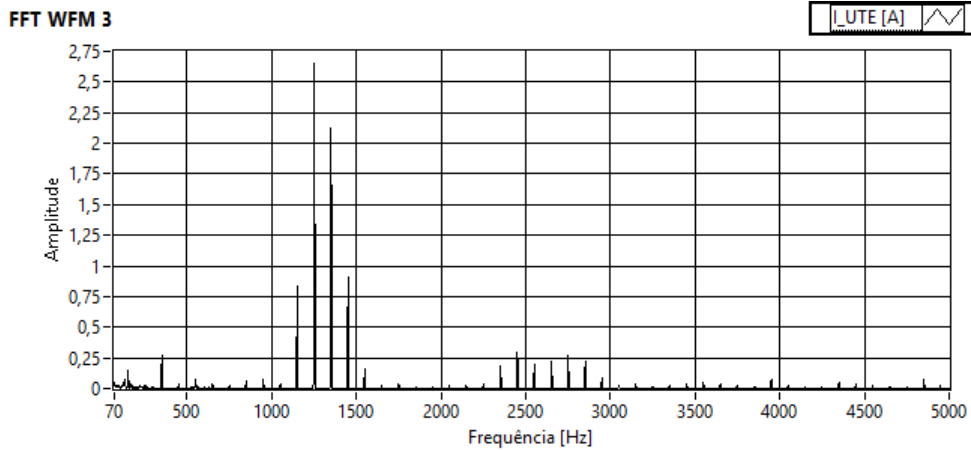


Figura A.39 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2 – Gravação 1

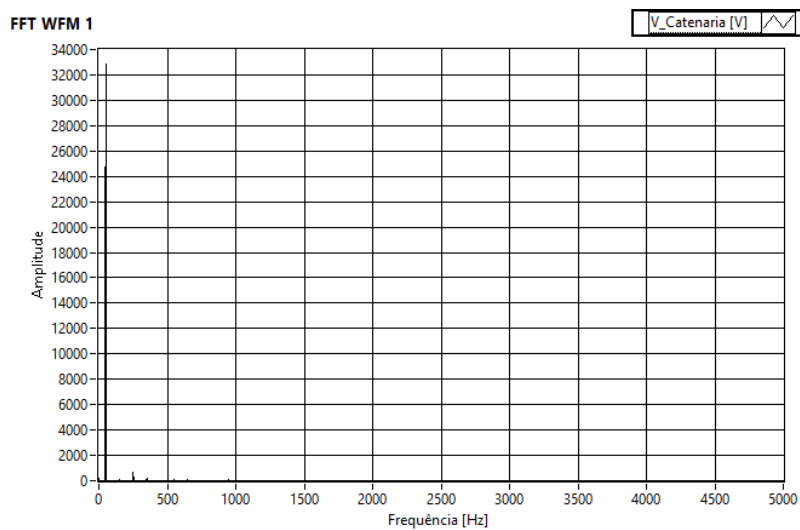


Figura A.40 - Espectro da Tensão da Catenária medido

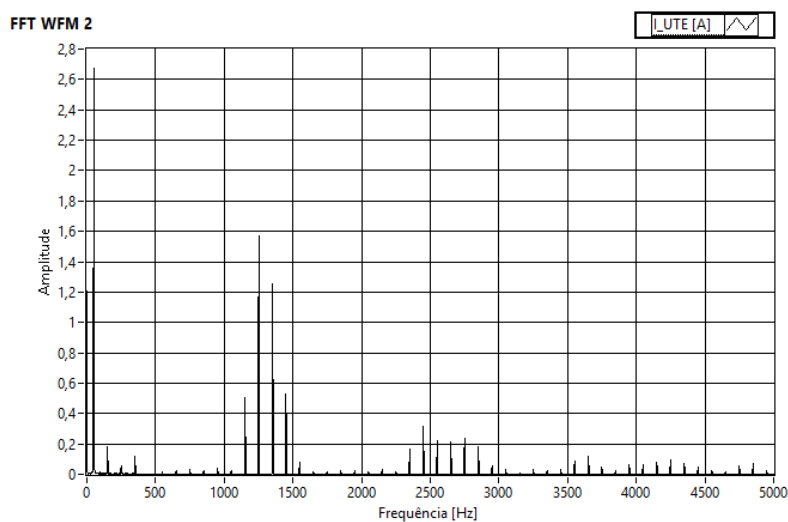


Figura A.41 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1 - Gravação 2

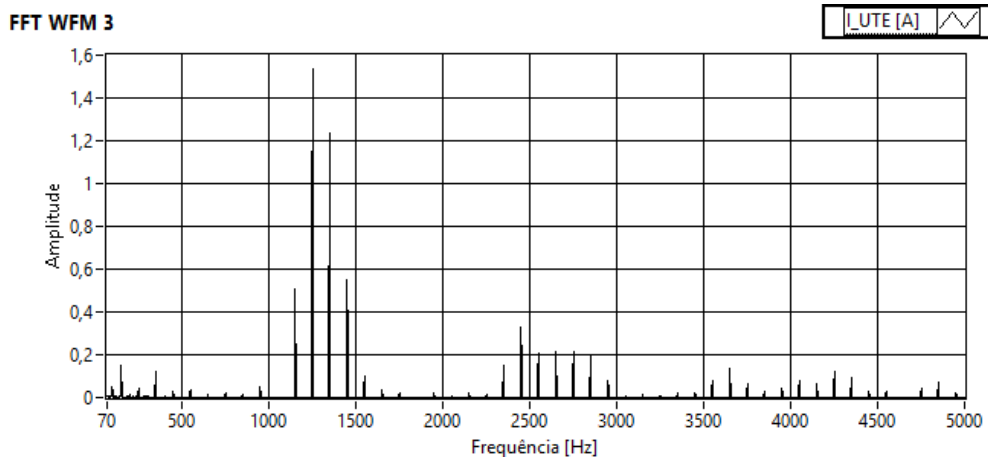


Figura A.42 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2 - Gravação 2

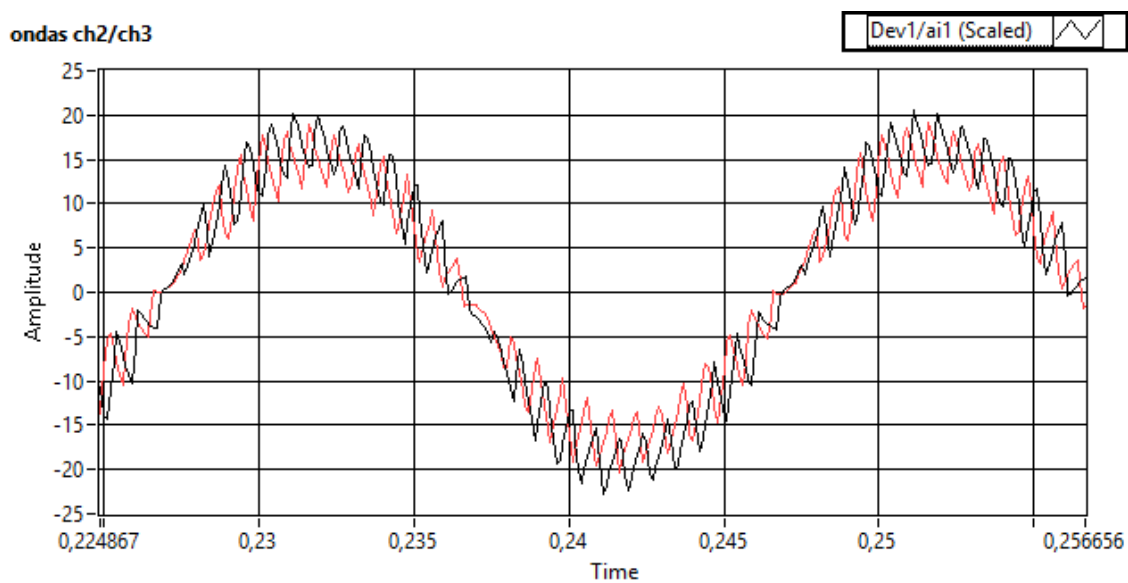


Figura A.43 - Entrelaçamento das Correntes das Unidades Motoras 1 e 2

Local:	Grândola – Faro
Data:	07/03/2006
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	650

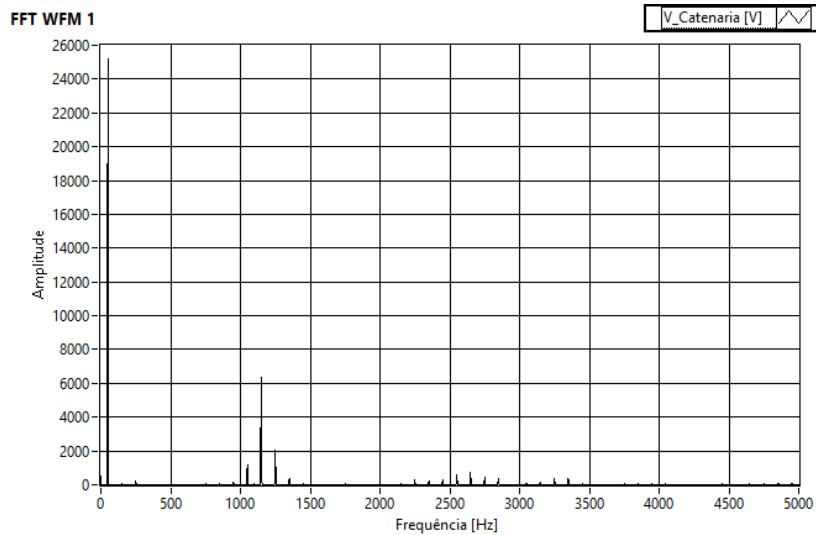


Figura A.44 - Espectro da Tensão da Catenária medido - Gravação 1

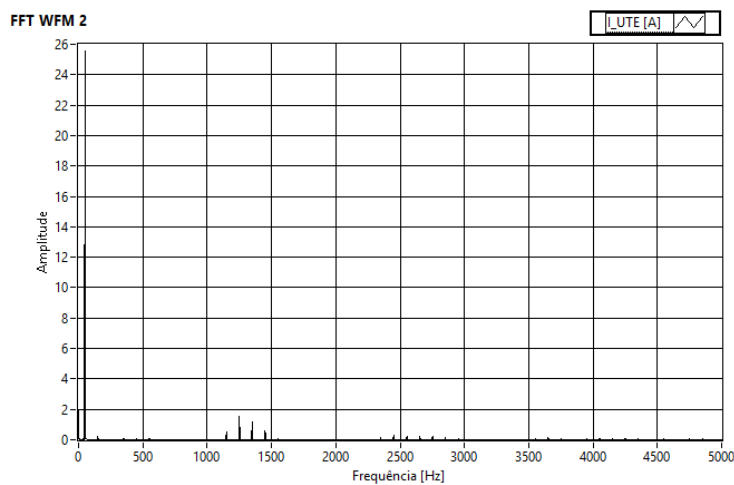


Figura A.45 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1 - Gravação 1

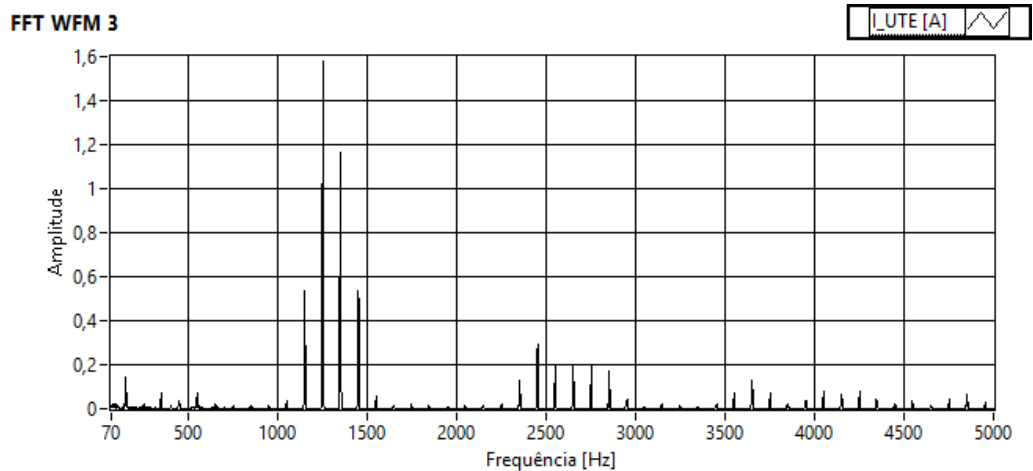


Figura A.46 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2 - Gravação 1

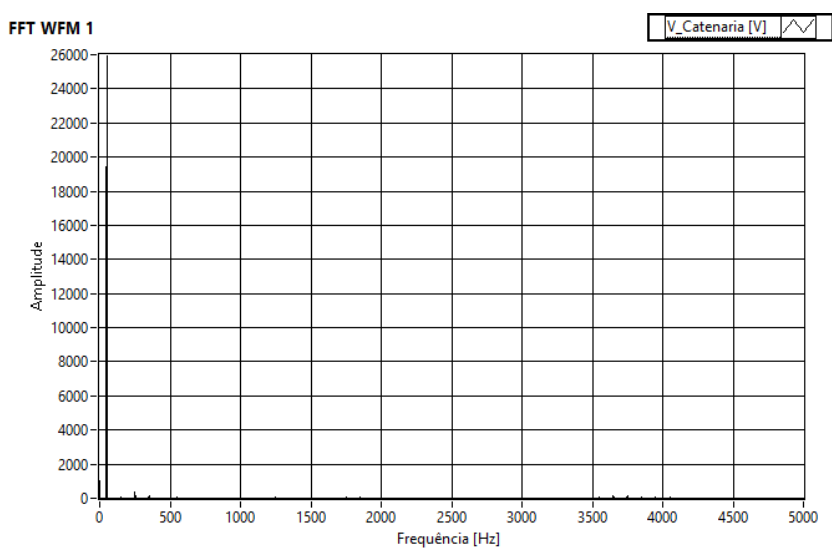


Figura A.47 - Espectro da Tensão da Catenária medido - Gravação 2

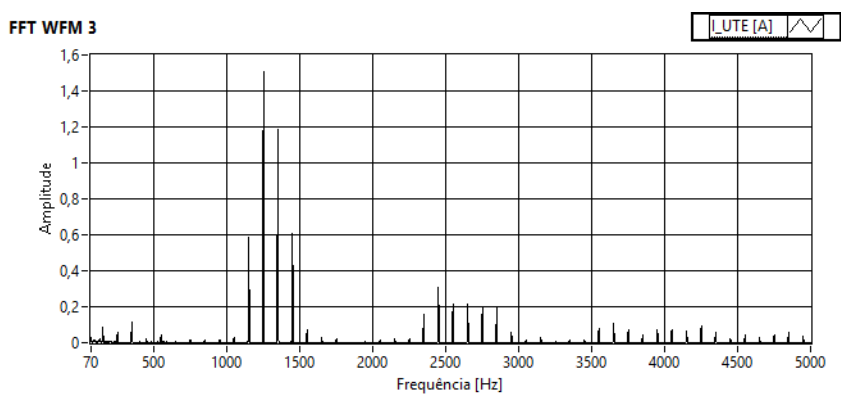


Figura A.48 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1 - Gravação 2

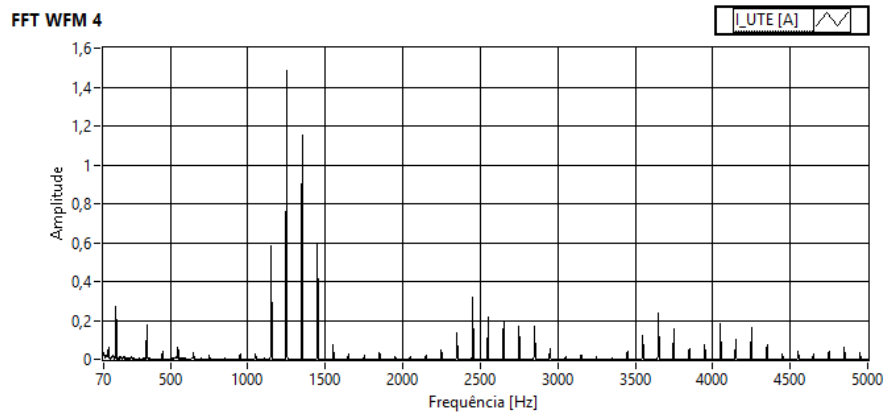


Figura A.49 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2 - Gravação 2

Local:	Entroncamento
Data:	03/07/2005
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	450

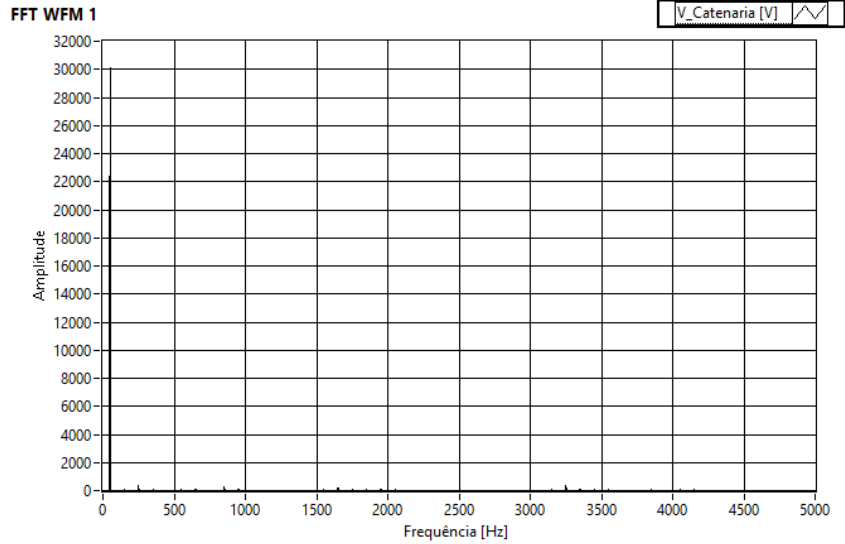


Figura A.50 - Espectro da Tensão da Catenária medido - Gravação 1

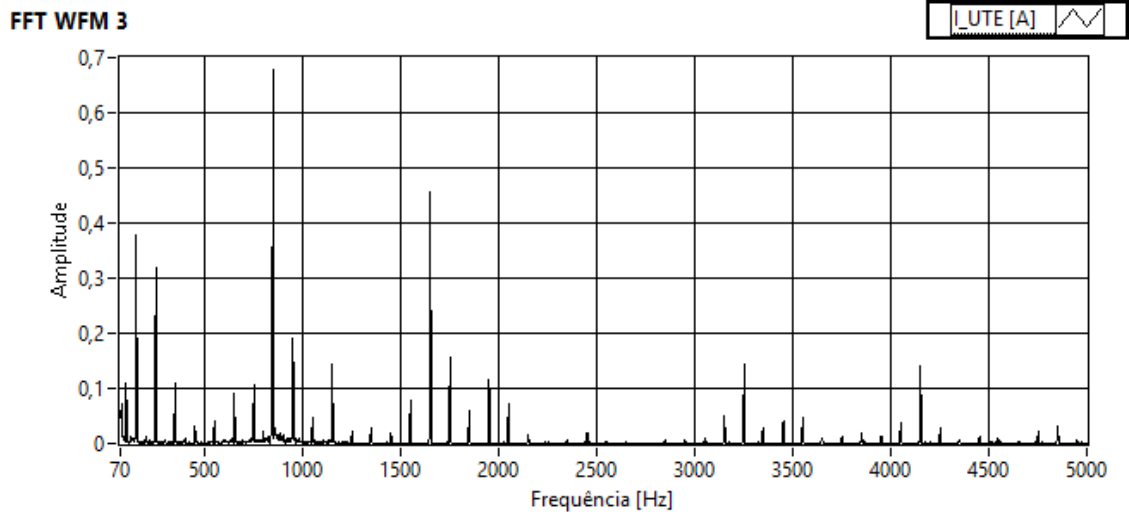


Figura A.51 - Espectro da Corrente na Unidade Motora - Gravação 1

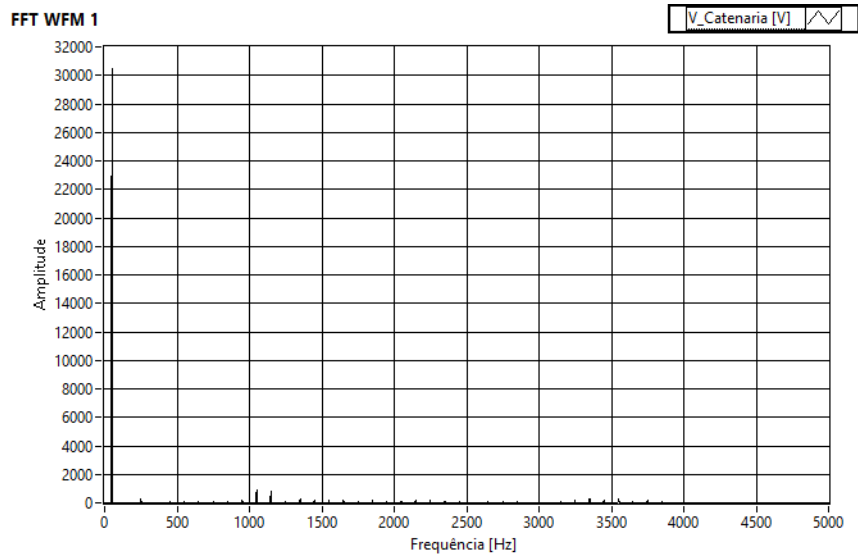


Figura A.52 - Espectro da Tensão da Catenária medido - Gravação 2

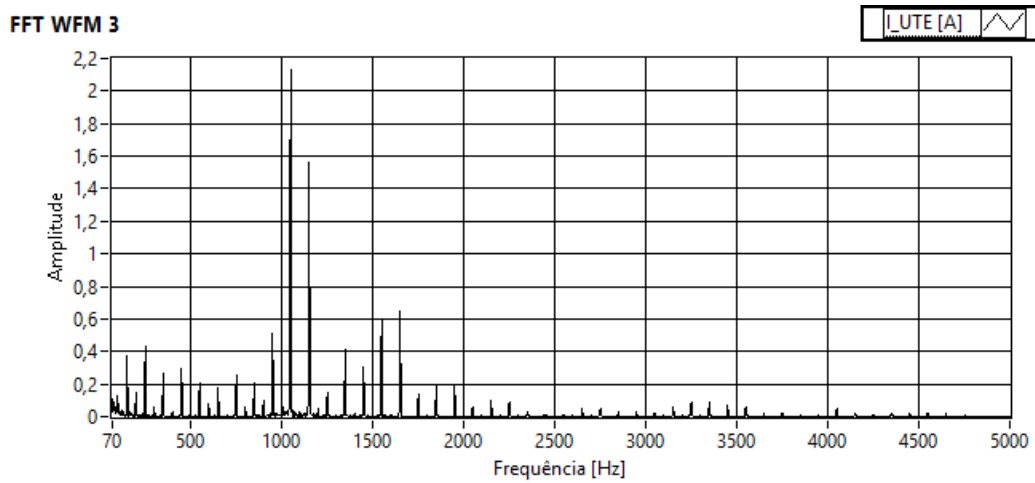


Figura A.53 - Espectro da Corrente na Unidade Motora - Gravação 2

Local:	Mogofores
Data:	23/04/2006
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	450

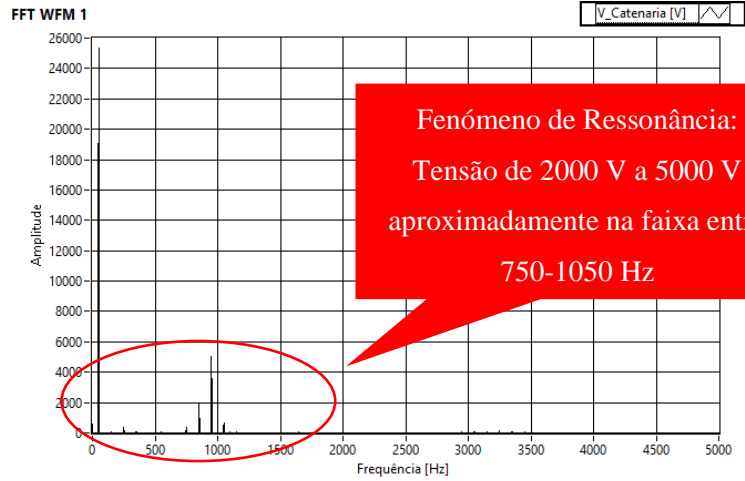


Figura A.54 - Espectro da Tensão da Catenária medido

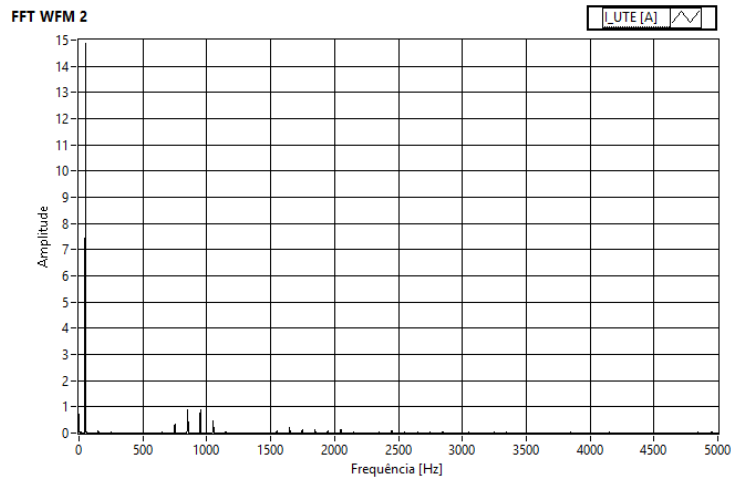


Figura A.55 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1

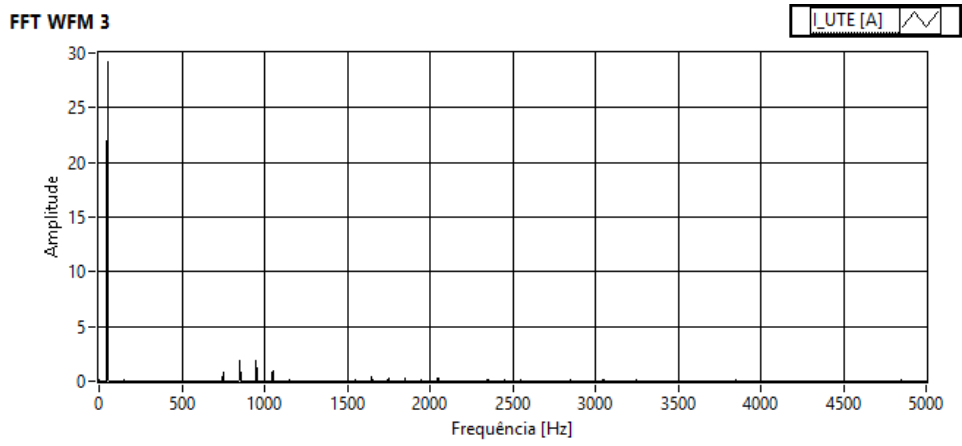


Figura A.56 - Espectro da Corrente na Unidade motora 2

Local:	Vilar Formoso
Data:	22/02/2006
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	650

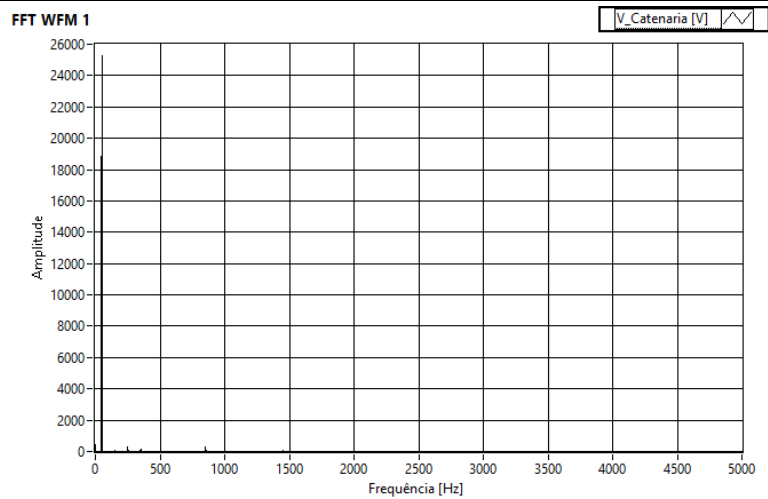


Figura A.57 - Espectro da Tensão da Catenária medido - Gravação 1

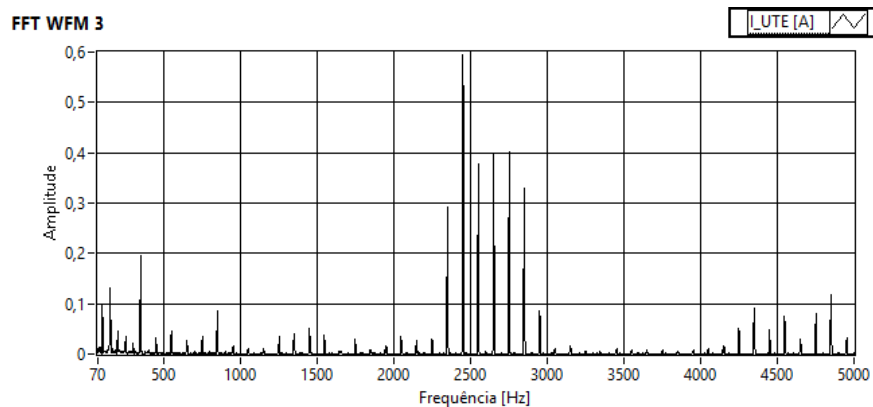


Figura A.58 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1 - Gravação 1

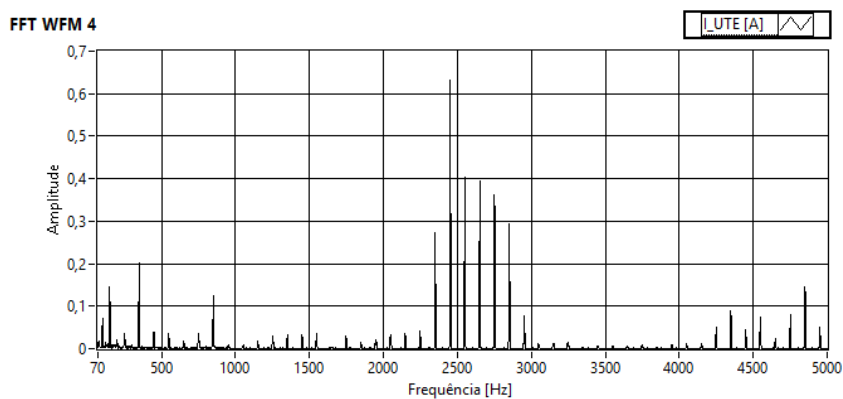


Figura A.59 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2 - Gravação 1

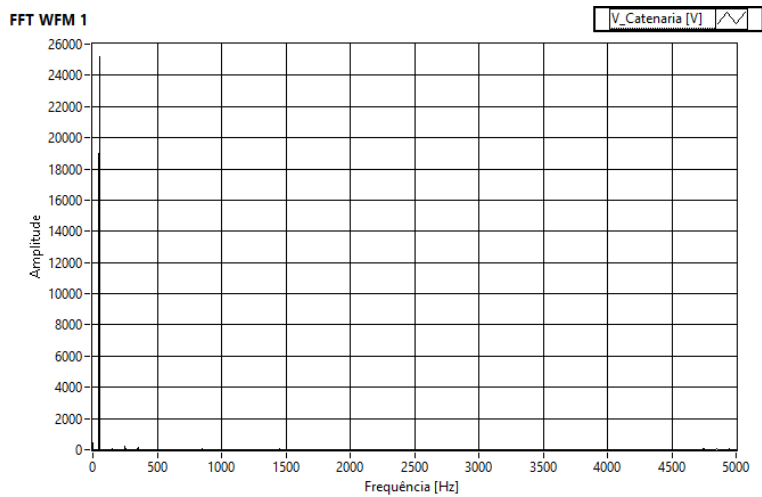


Figura A.60 - Espectro de Tensão da Catenária medido - Gravação 2

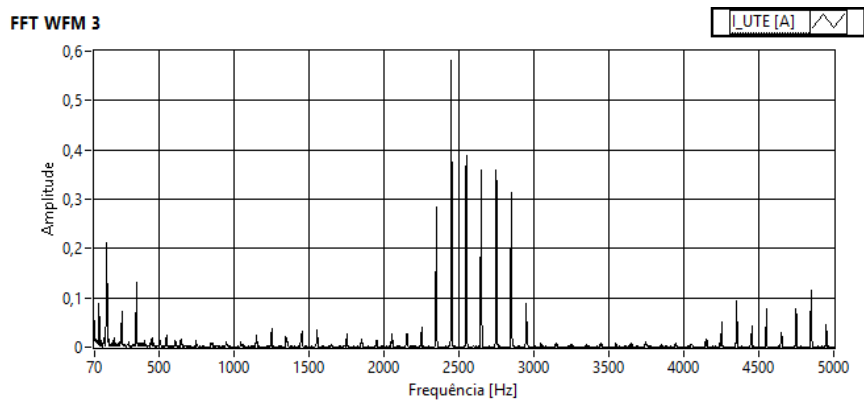


Figura A.61 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1 - Gravação 2

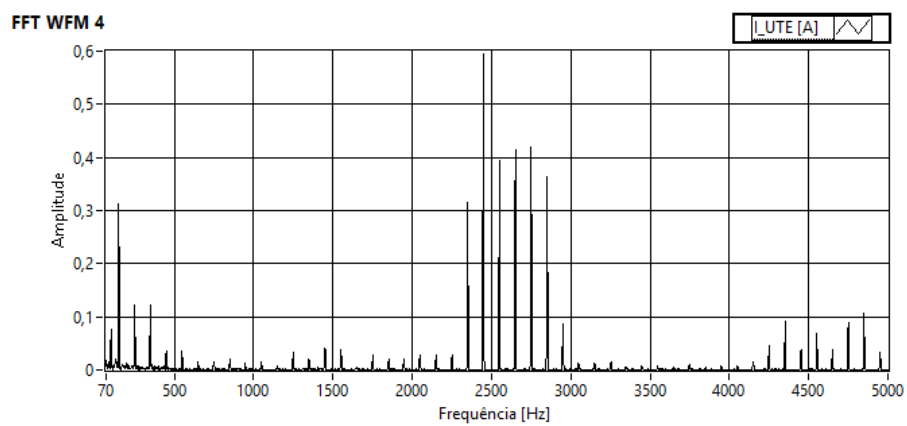


Figura A.62 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 2 - Gravação 2

Local:	Subestação de Alfarelos
Data:	22/05/2005
Frequência de Operação dos Conversores de Tração [Hz]:	450

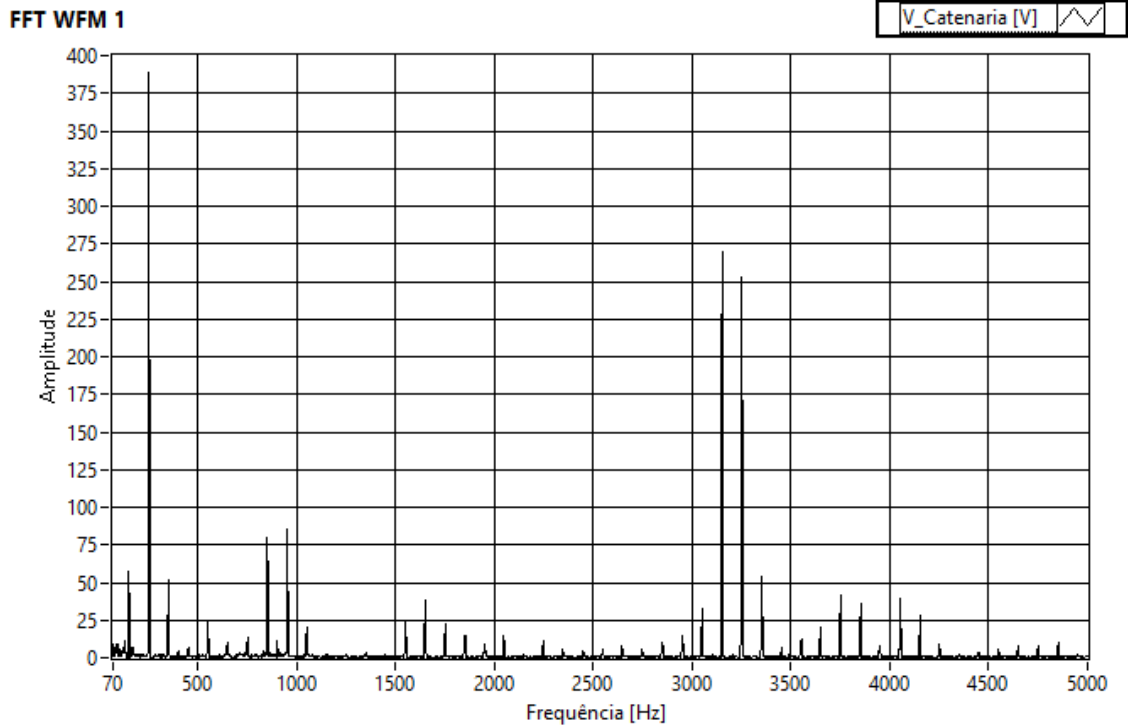


Figura A.63 - Espectro da Tensão da Catenária medido sem a componente de 50 Hz- Gravação 1

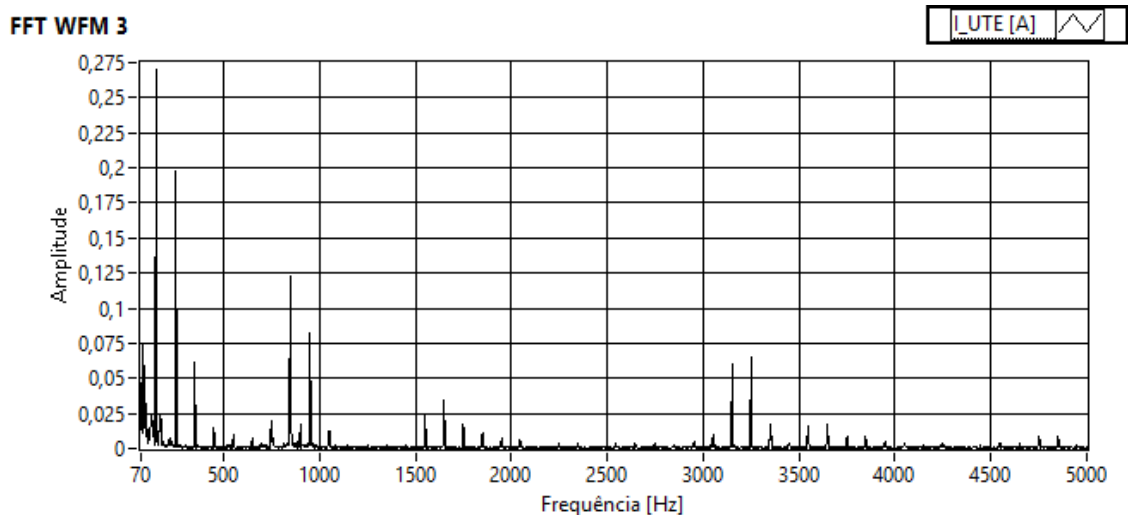


Figura A.64 - Espectro da Corrente na Unidade Motora 1 - Gravação 1

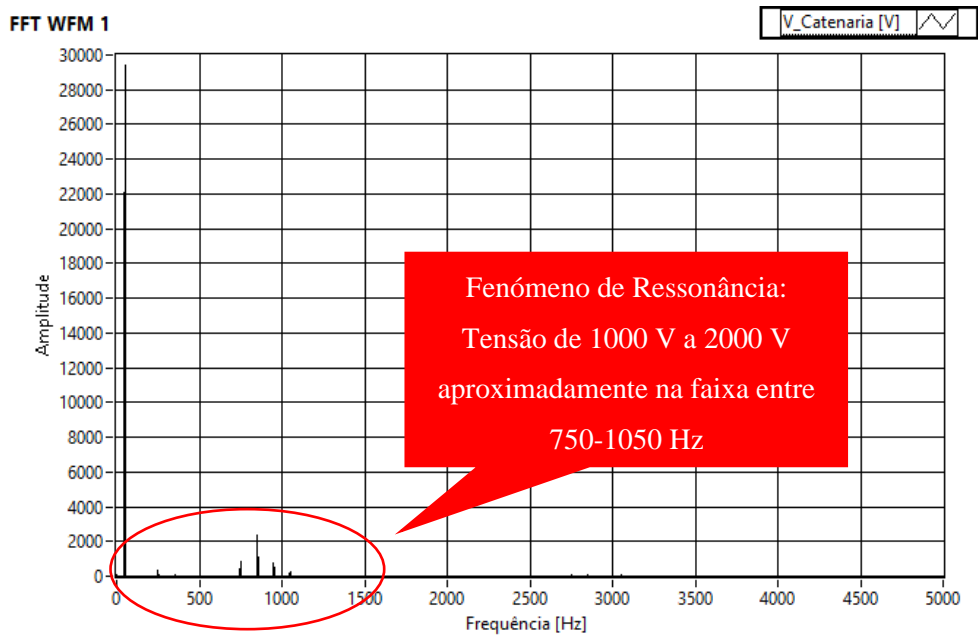


Figura A.65 - Espectro da Tensão da Catenária medido - Gravação 2

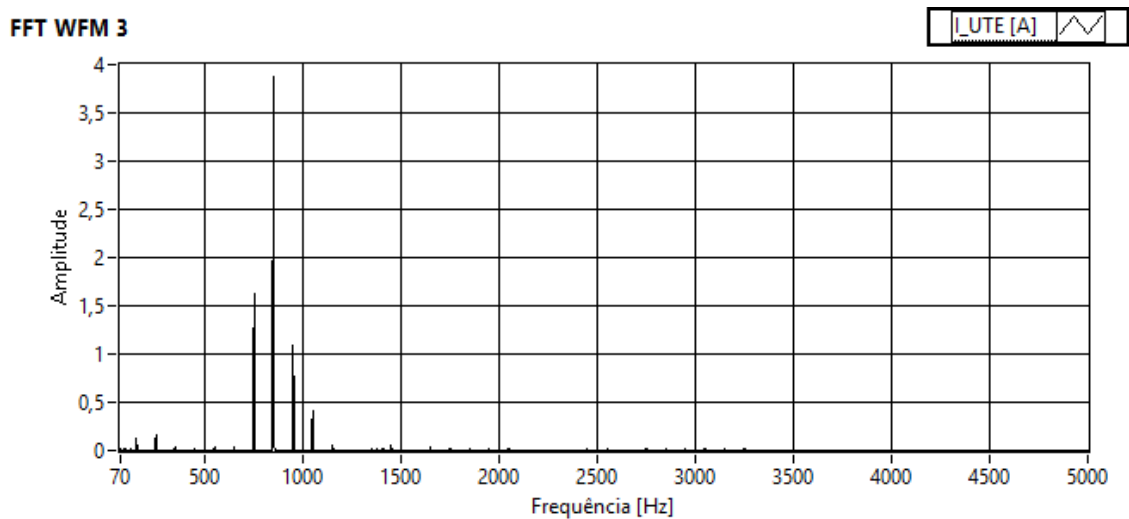


Figura A.66 - Espectro da Corrente na Unidade Motora - Gravação 2

Anexo B.

Esquema Elétrico de Alimentação da SST de Quinta Grande

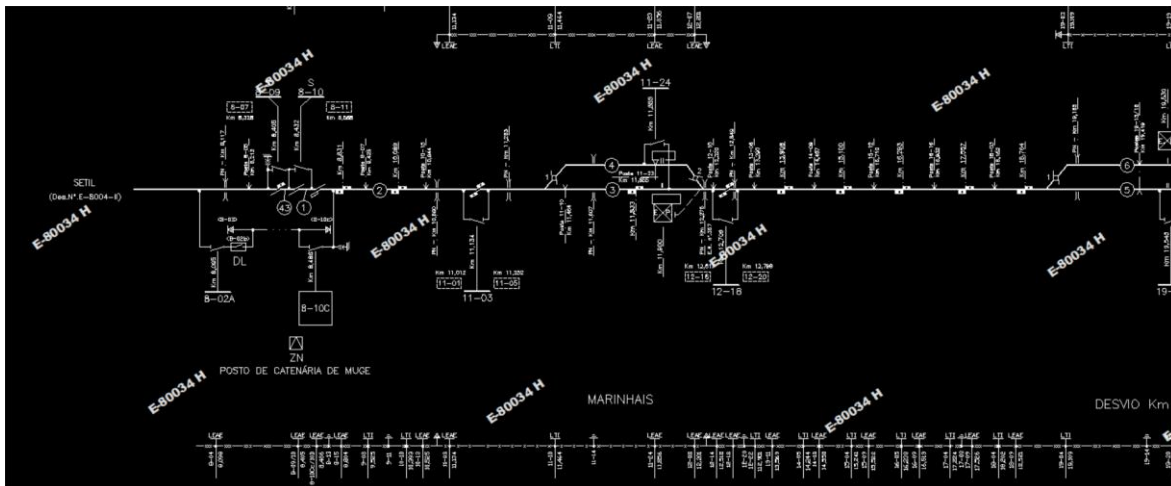


Figura B.1 - Esquema Elétrico de Alimentação da SST de Quinta Grande – ZN Muge/Desvio KM 19,5

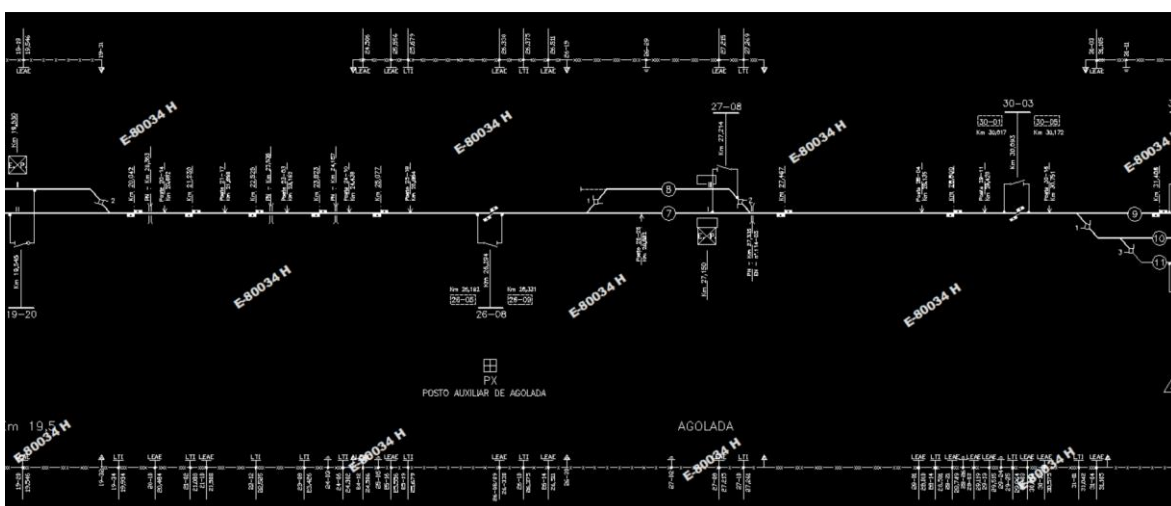


Figura B.2 - Esquema Elétrico de Alimentação da SST de Quinta Grande – Desvio KM 19,5/Coruche

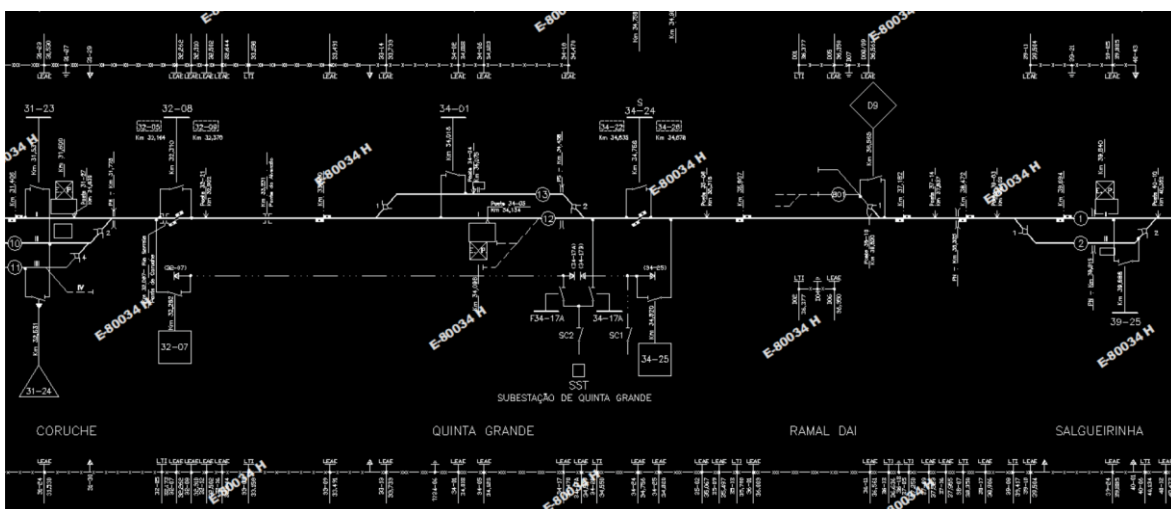


Figura B.3 - Esquema Elétrico de Alimentação da SST de Quinta Grande – Coruche/Salgueirinha

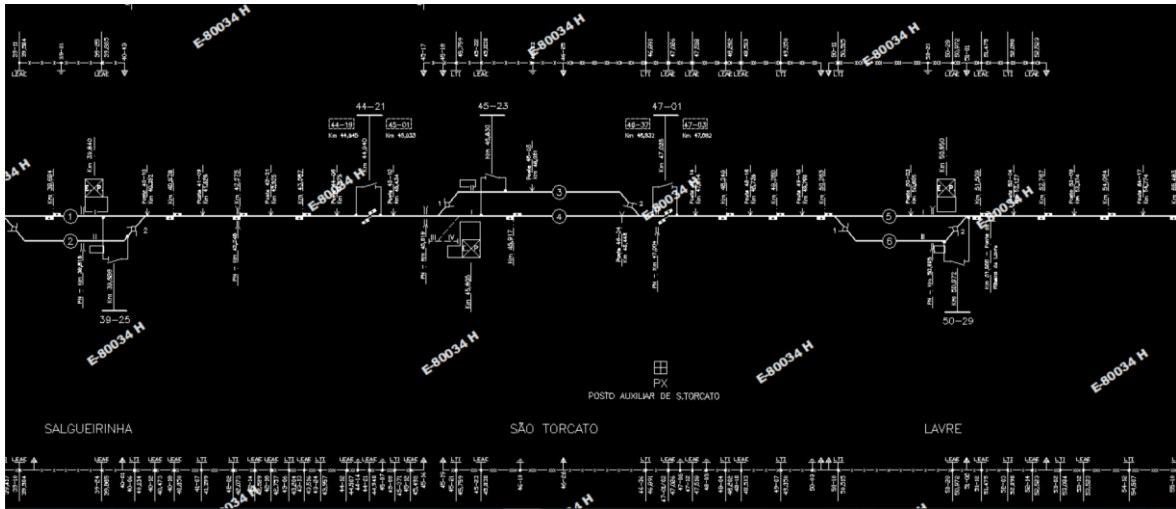


Figura B.4 - Esquema Elétrico de Alimentação da SST de Quinta Grande –Salgueirinha/Lavre

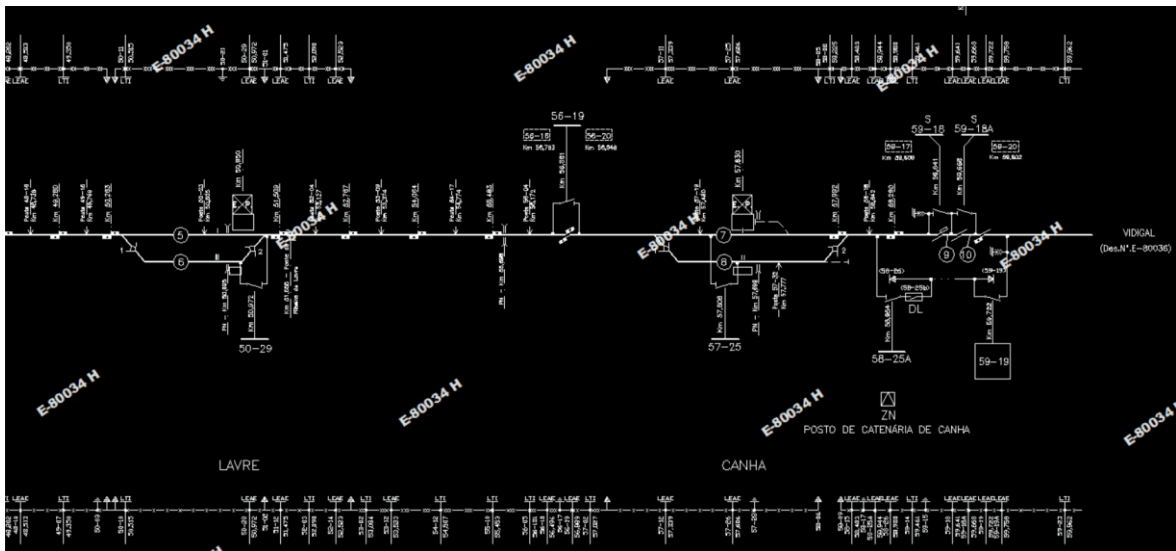


Figura B.5 - Esquema Elétrico de Alimentação da SST de Quinta Grande –Lavre/ZN Canha

Anexo C.

Scripts MATLAB

```

%% SCRIPT DE INJEÇÃO DE CORRENTE E VARRIMENTO NA FREQUÊNCIA
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

str = questdlg('Deseja utilizar as variáveis em memória?', ...
    'Variáveis em Memória', ...
    'Sim','Não','Sim');%opcao 1, opcao2 , opcao default

if str=='Não' %%caso seja "nao", o matlab elimina todas as variáveis que
se encontram em memória

    clc
    clear all
    run('SST_Inputs'); %%Corre este script

end

%%Vetores onde serão armazenados os dados das várias iterações
I_R=zeros(0,200);
I_L=zeros(0,200);
I_INJ=zeros(0,200);
V_INJ=zeros(0,200);
Z_L=zeros(0,200);
Z_R=zeros(0,200);
Z_TOTAL=zeros(0,200);
freq=zeros(0,200);

%%Guarda os vetores anteriores num ficheiro .mat
save ('I_R.mat','I_R')
save ('I_L.mat','I_L')
save ('I_INJ.mat','I_INJ')
save ('V_INJ.mat','V_INJ')
save ('Z_L','Z_L')
save ('Z_R','Z_R')
save ('Z_TOTAL','Z_TOTAL')
save ('freq','freq')

%% -----

%% Muge-Canha -> SST Quinta Grande
j=0
%
for f=50:50:10000

    if f==10000
        f=9999; %%problema na simulação com f=10 kHz - calculo com 9999
        Hz
            %%(aproximação) - assume-se como valor quase identico a
            %%10 kHz
    end

I_injectionIN=100; %%Corrente a ser injetada no modelo "Injection"

R_source=10; %%Resistência da fonte de corrente. Valor mínimo
            %%obtido para que a simulação convergisse

f

run('CarsonClem_SST_QuintaGrande_vu'); %%Executa este script

```

```

sim(strcat('model_2T_QuintaGrande')) %%Simula o modelo simulink nas
%%condições previamente indicadas

%%leitura dos valores apartir do modelo "Injection"
I_inj_R_read=I_inj_R
I_inj_L_read=I_inj_L
I_inj_OUT_read=I_inj_OUT
V_inj_OUT_read=V_inj_OUT
Z_Right=V_inj_OUT_read/I_inj_R_read
Z_Left=V_inj_OUT_read/I_inj_L_read
Zp=V_inj_OUT_read/I_inj_OUT_read

%%Os valores lidos anteriormente são guardados nos vetores inicialmente
%%definidos
j=j+1
freq(j)=f
I_R(j)=I_inj_R_read
I_L(j)=I_inj_L_read
I_INJ(j)=I_inj_OUT_read
V_INJ(j)=V_inj_OUT_read
Z_R(j)=Z_Right
Z_L(j)=Z_Left
Z_TOTAL(j)=Zp

save ('I_R.mat', 'I_R')
save ('I_L.mat', 'I_L')
save ('I_INJ.mat', 'I_INJ')
save ('V_INJ.mat', 'V_INJ')
save ('Z_L', 'Z_L')
save ('Z_R', 'Z_R')
save ('Z_TOTAL', 'Z_TOTAL')
save ('freq', 'freq')

end

%%Carrega os ficheiros abaixo identificados para indicar na janela de
%%simulação os valores obtidos para todas as frequências
load Z_TOTAL.mat
load freq.mat

FreqT=transpose(freq)
Z_T=transpose(Z_TOTAL)

T1 = table(FreqT,Z_T)

%%Guarda a tabela anterior criada num ficheiro .txt para posterior
análise
%%de dados. (a cada nova simulação esta tabela será substituida pelos
novos
%%valores)
writetable(T1, 'sim_report.txt');

```

```

%% INPUTS DA SUBESTAÇÃO, COMBOIO E FORNECIMENTO DE ENERGIA À SST
%% CALCULO DO TRANSFORMADOR, COMBOIO E REN %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% CALCULO DE UM TRANSFORMADOR PARA UMA INSTALACAO 1X25 kV com 16,2MVA
SST
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Toma-se como base o Relat de Ensaio de Transformador
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

global Sbase_transf Vbase_prim Ibase_at_prim Pn_transf
Pn_transf_sobrecarga
global Vbase_sec w_sst C_sst;

w_sst=2*pi*50;

perguntas = {'Qual é a potência nominal da SST? (em VA):','Qual é a
tensão do lado primário do transformador da SST? (em V):','Qual é a
tensão do lado secundário do transformador da SST? (em V):','Qual é o
valor de perdas em vazio medido (em W)?','Qual é o valor da intensidade
de corrente medido (em %)?','Qual é o valor da resistência dos
enrolamentos do lado AT (em Ohm)?','Qual é o valor da resistência dos
enrolamentos do lado BT (em Ohm)?','Qual é o valor da tensão de curto-
circuito (em %)?','Qual é o valor das perdas em curto-circuito medido
(em W)?','Qual é o valor da capacidade da SST (em F)?'};
dlgtitle = 'Inputs para cálculo do transformador da SST (valores
Default)';
dims = [2 105];
definput =
{'16.2e6','150e3','27.5e3','13900','0.18','1.44','0.0435','9.26','44600',
'6e-9'};
respostas = inputdlg(perguntas,dlgtitle,dims,definput)

Pn_transf = str2num(respostas{1});

Pn_transf_sobrecarga=Pn_transf*2;

Sbase_transf=Pn_transf;

Vbase_prim = str2num(respostas{2});

Vbase_sec = str2num(respostas{3});

Ibase_at_prim=Sbase_transf/Vbase_prim;

%% Ensaio em vazio
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

global W_vazio Voh Ioh_at Rexc_Tr Lexc_Tr a_tr Ioh_at_percent;

W_vazio = str2num(respostas{4});

Ioh_at_percent = str2num(respostas{5});

Ioh_at=(Ioh_at_percent*Ibase_at_prim)/100;

```

```

Voh=Vbase_prim;          %% considera-se Voh aproximadamente igual a Vbase

Rexc_Tr=(Voh)^2/W_vazio;

Lexc_Tr=(Voh)/(w_sst*sqrt((Ioh_at)^2-((Voh)/Rexc_Tr)^2));

%% Ensaio em curto-circuito
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

global Rat_dc Rbt_dc Rh_ac Leq_tr ratio_dc Rh_tr Rl_tr Lh_tr Ll_tr
Vcc_perc Vcc Zcc PerdasCC Vat1_peak Ratm Latm;

Rat_dc = str2num(respostas{6});

Rbt_dc = str2num(respostas{7});

Vcc_perc = str2num(respostas{8});

PerdasCC = str2num(respostas{9});

Vcc=(Vcc_perc*Vbase_prim)/100;

a_tr=Vbase_prim/Vbase_sec;

Rh_ac=Rat_dc+(a_tr^2)*Rbt_dc;

Zcc=(Vbase_prim/Ibase_at_prim)*Vcc_perc/100;

Leq_tr=(sqrt(Zcc^2-Rh_ac^2))/w_sst;

ratio_dc=Rbt_dc/Rat_dc;

%% Adequacao aos parametros do simulink
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

format long;
%
Ratm=Rexc_Tr;
Latm=Lexc_Tr;

Lh_tr=Leq_tr/(1+((a_tr^2)*ratio_dc));

Rh_tr=Rh_ac/(1+((a_tr^2)*ratio_dc));

Rl_tr=ratio_dc*Rh_tr;

Ll_tr=ratio_dc*Lh_tr;

Vat1_peak=Vbase_prim*sqrt(2);

C_sst = str2num(respostas{10});

```

```

%% POTENCIA DE UM COMBOIO E L_TRAIN
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Comboio = {'Qual é o valor da tensão de operação do comboio (em
V)?:', 'Qual é o valor da corrente de operação do comboio (em A)?:', 'Qual
é o valor da tensão do lado do fornecedor de energia? - REN/EDP (em
V)?:', 'Qual é o valor do comprimento do cabo de entrega d SST REN/EDP?
(em Km)?:', 'Qual é o valor, em PU, da resistência do cabo fornecida pela
REN/EDP? (em Ohm)?:', 'Qual é o valor de resistência do cabo (ver
tipologia) por Km fornecida por um catálogo de cabos? (em Ohm)?:', 'Qual é
o valor, em PU, da reactância do cabo fornecida pela REN/EDP? (em
Ohm)?:', 'Locomotiva ou Automotora?:'};
dlgtitle_train = 'Inputs para cálculo das características do Comboio e
Fornecimento de Energia (Valores Default)';
dims_train = [2 105];
definput_train =
{'25e3', '65', '150e3', '35', '0.01932', '0.1093', '0.06504', 'Automotora'};
respostas_train =
inputdlg(Comboio,dlgtitle_train,dims_train,definput_train)

global R_train V_train I_train P_train_VA P_train_W I_train_w Z_train
Q_train Xl_train Ltrain;

V_train = str2num(respostas_train{1});

I_train = str2num(respostas_train{2});

P_train_VA=V_train*I_train;    %% se comparado com o valor de potencia das
automotoras 2240 existentes na web, esta potência é aproximadamente igual

P_train_W=P_train_VA*0.8;
I_train_w=P_train_W/V_train;

R_train=V_train^2/P_train_W;
%%R_train=V_train/I_train;

Z_train=P_train_VA/(I_train_w^2);

Q_train=V_train^2/Z_train;

Xl_train=Q_train/(I_train_w^2);

Ltrain=Xl_train/(100*pi); %utiliza-se uma indutância equivalente, pois a
resistência equivalente não dá valores fidedignos

%% Impedancia Linha da REN
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

global R_REN L_REN X_REN;

Ub = str2num(respostas_train{3});

Sb=100e6;
Ib=Sb/Ub;
Zb=Ub/Ib;

```

```

length = str2num(respostas_train{4});

r_pu = str2num(respostas_train{5});

r_km = str2num(respostas_train{6});

r_cabo=length*r_km;
rbase=r_cabo/r_pu;

x_pu = str2num(respostas_train{7});

xbase=sqrt(((Zb)^2)-((rbase)^2));
x_cabo=x_pu*xbase;
x_km=x_cabo/length;

R_REN=r_cabo;
X_REN=x_km*length;
L_REN=X_REN/w_sst;

%% Cabos LXV
%%%%%%%%%%%%%%

%%calculado, mas não utilizado na simulação
RLXV=4.43e-4/2;
RLXV5=4.43e-4;

```

```

%% CALCULO DAS VARIÁVEIS ATRAVÉS DAS EQUAÇÕES DE CARSON-CLEM
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

global r1 r2 r3 r4 r5 w ro1 ro2 ro3 ro4 ro5 sigma1 sigma2 sigma3 sigma4
sigma5 u0 ur1 ur2 ur3 ur4 ur5
global rint1 rint2 rint3 rint4 rint5 lint1 lint2 lint3 lint4 lint5 scale
global l11 l12 l13 l14 l15 l21 l22 l23 l24 l25 l31 l32 l33 l34 l35 l41
l42 l43 l44 l45
global l51 l52 l53 l54 l55
global R_cdta A_cdta A_cat A_Rail3 A_Rail4 A_cdte

%% Catenária
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
A_cat=0.000164;
sigma1=5.60e7;
ro1=1/sigma1;
ur1=1;
x1=0;
y1=6.2;
Cat=[A_cat sigma1 ro1 ur1 x1 y1];
hCat={'Area_fio_Catenaria_m2','sigma_catenaria','rho_catenaria','ur_caten
aria','posicaoX_catenaria_m','posicaoY_catenaria_m'};
Catenaria=array2table(Cat,'VariableNames',hCat);

%% Cabo de Terra Enterrado- CDTE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
A_cdte=0.000078;
ro2=8.95e-8;
sigma2=1/ro2;
ur2=1;
x2=2.5;
y2=0;
cdte=[A_cdte sigma2 ro2 ur2 x2 y2];
hcdte={'Area_CDTE_m2','sigma_CDTE','rho_CDTE','ur_CDTE','posicaoX_CDTE_m'
,'posicaoY_CDTE_m'};
CDTE=array2table(cdte,'VariableNames',hcdte);

%% Rail3
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
A_Rail3=7.69e-3; %Dolara
ro3=0.000000143;
sigma3=4000000;
ur3=5;
perimetro3=2*pi*0.1077;
x3=-0.834;
y3=0.65;
vRail3=[A_Rail3 sigma3 ro3 ur3 perimetro3 x3 y3];
hRail3={'Area_Rail3_m2','sigma_Rail3','rho_Rail3','ur_Rail3','perimetro_R
ail3','posicaoX_Rail3_m','posicaoY_Rail3_m'};
Rail3=array2table(vRail3,'VariableNames',hRail3);

%% Rail4
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
A_Rail4=7.69e-3; %Dolara
ro4=0.000000143;

```

```

sigma4=4000000;
ur4=5;
perimetro4=2*pi*0.1077;
x4=0.834;
y4=0.65;
vRail4=[A_Rail4 sigma4 ro4 ur4 perimetro4 x4 y4];
hRail4={'Area_Rail4_m2', 'sigma_Rail4', 'rho_Rail4', 'ur_Rail4', 'perimetro_Rail4', 'posicaoX_Rail4_m', 'posicaoY_Rail4_m'};
Rail4=array2table(vRail4, 'VariableNames', hRail4);

```

```

%% Cabo de Terra Aereo- CDTA

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

A_cdta=0.000093;
sigma5=3.57e7;
ro5=1/sigma5;
ur5=1;
R_cdta=0.49; %Ohm/km
x5=3.3;
y5=6.87;
cdta=[A_cdta sigma2 ro2 ur2 x2 y2];
hcdta={'Area_CDTA_m2', 'sigma_CDTA', 'rho_CDTA', 'ur_CDTA', 'posicaoX_CDTA_m', 'posicaoY_CDTA_m'};
CDTA=array2table(cdta, 'VariableNames', hcdta);

```

```

%% Calculos pelas eq. Carson Clem para via única

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

u0=4*pi*(1E-7);

```

```

u1=ur1*u0;
u2=ur2*u0;
u3=ur3*u0;
u4=ur4*u0;
u5=ur5*u0;

```

```

%% Resistividade da Terra

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

ro=100; %ohm/m - pode ser ainda 200 ou 400 (escolher)

```

```

%% Escala do modelo base MTL - Rectangulos Azuis

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

scale=500; % em metros

```

```

%% Frequencia angular

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

w=2*pi*f;

```

```

%% Raio, Efeito pelicular e Impedancia Internados do condutores rint e lint

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
```

```

% 1 mm2 = 1e-6 m2

r1=sqrt(A_cat/pi);
delta1= 1/sqrt(pi*f*u1*sigma1);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

r2=sqrt(A_cdte/pi);           % resultado em metros
delta2= 1/sqrt(pi*f*u2*sigma2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

r3=sqrt(A_Rail3/pi);
delta3=1/sqrt(pi*f*u3*sigma3);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

r4=sqrt(A_Rail4/pi);
delta4=1/sqrt(pi*f*u4*sigma4);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

r5=sqrt(A_cdta/pi);           % resultado em metros
delta5=1/sqrt(pi*f*u5*sigma5);

%% Usando agora o criterio de Paul Clayton
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

if r1<2*delta1;
    disp('r1<2*delta1');
    zint1=scale*((1/(sigma1*pi*r1^2))+1i*(2*pi*f)*(u1/(8*pi)));
    rint1=scale*(1/(sigma1*pi*r1^2));
    lint1=(imag(zint1))/(2*pi*f);
else
    disp('r1>2*delta1');
    zint1=scale*((1/(2*r1))*sqrt(u1/(pi*sigma1))*sqrt(f) +
(1i)*w*(1/(4*pi*r1))*sqrt(u1/(pi*sigma1))*(1/sqrt(f)));
    rint1=scale*((1/(2*r1))*sqrt(u1/(pi*sigma1))*sqrt(f));
    lint1=(imag(zint1))/(2*pi*f);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

if r2<2*delta2;
    disp('r2<2*delta2');
    zint2=scale*((1/(sigma2*pi*r2^2))+1i*w*(u2/(8*pi)));
    rint2=scale*(1/(sigma2*pi*r2^2));
    lint2=(imag(zint2))/(2*pi*f);
else
    disp('r2>2*delta2');
    zint2=scale*((1/(2*r2))*sqrt(u2/(pi*sigma2))*sqrt(f) +
(1i)*w*(1/(4*pi*r2))*sqrt(u2/(pi*sigma2))*(1/sqrt(f)));
    rint2=scale*((1/(2*r2))*sqrt(u2/(pi*sigma2))*sqrt(f));
    lint2=(imag(zint2))/(2*pi*f);
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

if r3<2*delta3;
    disp('r3<2*delta3');
    zint3=scale*((1/(sigma3*pi*r3^2))+li*w*(u3/(8*pi)));
    rint3=scale*(1/(sigma3*pi*r3^2));
    lint3=(imag(zint3))/(2*pi*f);
else
    disp('r3>2*delta3');
    zint3=scale*((1/(2*r3))*sqrt(u3/(pi*sigma3))*sqrt(f) +
    (li)*w*(1/(4*pi*r3))*sqrt(u3/(pi*sigma3))*(1/sqrt(f)));
    rint3=scale*((1/(2*r3))*sqrt(u3/(pi*sigma3))*sqrt(f));
    lint3=(imag(zint3))/(2*pi*f);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

if r4<2*delta4;
    disp('r4<2*delta4');
    zint4=scale*((1/(sigma4*pi*r4^2))+li*w*(u4/(8*pi)));
    rint4=scale*(1/(sigma4*pi*r4^2));
    lint4=(imag(zint4))/(2*pi*f);
else
    disp('r4>2*delta4');
    zint4=scale*((1/(2*r4))*sqrt(u4/(pi*sigma4))*sqrt(f) +
    (li)*w*(1/(4*pi*r4))*sqrt(u4/(pi*sigma4))*(1/sqrt(f)));
    rint4=scale*((1/(2*r4))*sqrt(u4/(pi*sigma4))*sqrt(f));
    lint4=(imag(zint4))/(2*pi*f);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

rint5=scale*(0.49/1e3);
% lint5=scale*(1.0455e-6)
lint5=scale*(0.61e-7);
zint5=rint5+i*w*lint5;

%% Matrizes de Impedancia Interna dos condutores
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Zint_abs=[abs(zint1) 0 0 0 0; 0 abs(zint2) 0 0 0; 0 0 abs(zint3) 0 0; 0 0
0 abs(zint4) 0; 0 0 0 0 abs(zint5)];

Zint=[zint1 0 0 0 0; 0 zint2 0 0 0; 0 0 zint3 0 0; 0 0 0 zint4 0; 0 0 0 0
zint5]; % Zint - Conductor Internal Impedance per scale Diagonal
Matrix

Rint=[rint1 0 0 0 0; 0 rint2 0 0 0; 0 0 rint3 0 0; 0 0 0 rint4 0; 0 0 0 0
rint5];

Lint=[lint1 0 0 0 0; 0 lint2 0 0 0; 0 0 lint3 0 0; 0 0 0 lint4 0; 0 0 0 0
lint5];

%% Zg Impedancias Geométricas
%% Lg Indutancias propias e mútuas geométricas
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

global De x1 y1 x2 y2 x3 y3 x4 y4 x5 y5

d12=sqrt((x2-x1)^2+(y2-y1)^2);
d13=sqrt((x3-x1)^2+(y3-y1)^2);
d14=sqrt((x4-x1)^2+(y4-y1)^2);
d15=sqrt((x5-x1)^2+(y5-y1)^2);

d21=d12;
d23=sqrt((x3-x2)^2+(y3-y2)^2);
d24=sqrt((x4-x2)^2+(y4-y2)^2);
d25=sqrt((x5-x2)^2+(y5-y2)^2);

d31=d13;
d32=d23;
d34=sqrt((x4-x3)^2+(y4-y3)^2);
d35=sqrt((x5-x3)^2+(y5-y3)^2);

d41=d14;
d42=d24;
d43=d34;
d45=sqrt((x5-x4)^2+(y5-y4)^2);

d51=d15;
d52=d25;
d53=d35;
d54=d45;

Dxy=[d12 d13 d14 d15; d21 d23 d24 d25; d31 d32 d34 d35;d41 d42 d43 d45;
d51 d52 d53 d54];

%% Nesta matriz nao existem os termos dii

%% D_ij=sqrt((xi-xj)^2+(2*yi)^2) Distancia entre o condutor i e a imagem
do
%% condutor j relativamente ao plano de massa/terra

D_12=sqrt((x2-x1)^2+(y1+y2)^2);
D_13=sqrt((x3-x1)^2+(y1+y3)^2);
D_14=sqrt((x4-x1)^2+(y1+y4)^2);
D_15=sqrt((x5-x1)^2+(y1+y5)^2);

D_21=D_12;
D_23=sqrt((x3-x2)^2+(y2+y3)^2);
D_24=sqrt((x4-x2)^2+(y2+y4)^2);
D_25=sqrt((x5-x2)^2+(y2+y5)^2);

D_31=D_13;
D_32=D_23;
D_34=sqrt((x4-x3)^2+(y3+y4)^2);
D_35=sqrt((x5-x3)^2+(y3+y5)^2);

D_41=D_14;
D_42=D_24;
D_43=D_34;
D_45=sqrt((x5-x4)^2+(y4+y5)^2);

D_51=D_15;
D_52=D_25;
D_53=D_35;

```

```

D_54=D_45;

%% Calculo da Matriz A
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

a11=log((2*y1)/r1);
a12=log(D_12/d12);
a13=log(D_13/d13);
a14=log(D_14/d14);
a15=log(D_15/d15);

a21=a12;
a22=log((2*y2)/r2);
a23=log(D_23/d23);
a24=log(D_24/d24);
a25=log(D_25/d25);

a31=a13;
a32=a23;
a33=log((2*y3)/r3);
a34=log(D_34/d34);
a35=log(D_35/d35);

a41=a14;
a42=a24;
a43=a34;
a44=log((2*y4)/r4);
a45=log(D_45/d45);

a51=a15;
a52=a25;
a53=a35;
a54=a45;
a55=log((2*y5)/r5);

A=[a11 a12 a13 a14 a15; a21 a22 a23 a24 a25; a31 a32 a33 a34 a35; a41 a42
a43 a44 a45; a51 a52 a53 a54 a55];

%% Matriz de capacidades mutuas entre condutores
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

global epslon_0 Cg C

epslon_0=(1*1E-9)/(36*pi);

Cg=(scale*2*pi*epslon_0).*inv(A);
C=abs(Cg);

%% Profundidade do Efeito pelicular na Terra De (raio do cilindro)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

De=659*sqrt(ro/f);

%% Carson Clem Lg indutancias proprias e mutuas geometricas
%% da para calcular a impedancia geometrica usando jwLij
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

l11=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/r1);

```

```

l12=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d12);
l13=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d13);
l14=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d14);
l15=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d15);

l21=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d21);
l22=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/r2);
l23=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d23);
l24=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d24);
l25=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d25);

l31=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d31);
l32=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d32);
l33=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/r3);
l34=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d34);
l35=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d35);

l41=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d41);
l42=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d42);
l43=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d43);
l44=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/r4);
l45=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d45);

l51=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d51);
l52=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d52);
l53=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d53);
l54=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/d54);
l55=scale*((400*pi*1e-9)/(2*pi))*log(De/r5);

Lg=[l11 l12 l13 l14 l15; l21 l22 l23 l24 l25; l31 l32 l33 l34 l35; l41
l42 l43 l44 l45; l51 l52 l53 l54 l55];

% resistencia da terra - correspondente a uma distancia dada por scale
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Re=(pi^2)*f*(1e-7)*scale;

global r11 r12 r13 r14 r15 r16 r17 r21 r22 r23 r24 r25 r26 r27 r31 r32
r33 r34 r35 r36 r37 r41 r42 r43 r44 r45 r46 r47 r51 r52 r53 r54 r55 r56
r57 r61 r62 r63 r64 r65 r66 r67 r71 r72 r73 r74 r75 r76 r77;

% De acordo com informacao obtida num manual do sympower systems
% as resistencias cruzadas as quais se atribui o valor zero
% correspondem a um valor de resistencia infinito ou seja isolado. Usando
os
% valores que se apresentaram anteriormente o programa nao corre, da erro
!!
% misterio a desvendar oportunamente. Os valores de resistencia cruzada
% entram na matriz de indutancias mutuas, assim como os valores de
% resistencia propria da cada condutor.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

r11=rint1; % valor ja considerado em rint1
r12=0; % r12=10e-3 ligacao atraves de pendulos ao
colocar da erro !!
r13=0; % isolado
r14=0; % isolado

```

```

r15=0; % nao completamente isolado

r21=0; % r21=10e-3 ligacao atraves de pendulos ao
colocar da erro !!
r22=rint2; % valor ja considerado em rint2
r23=0; % isolado
r24=0; % isolado
r25=0; % nao completamente isolado

r31=0; % isolado
r32=0; % isolado
r33=rint3; % valor ja considerado em rint3
r34=0; % isolamento fornecido pelas travessas dado
pelo paralelo das travessas num comprimento igual a scale metros
r35=0; % da erro a serie resistencia de isolamento
do carril + resistencia de postes em paralelo na seccao de linha

r41=0; % isolado
r42=0; % isolado
r43=0; % isolamento fornecido pelas travessas
r44=rint4; % valor ja considerado em rint4
r45=0; % serie resistencia de isolamento do carril
+ resistencia de postes em paralelo na seccao de linha

r51=0; % nao completamente isolado
r52=0; % nao completamente isolado
r53=0; % resistencia de isolamento do carril +
resistencia de postes em paralelo na seccao de linha
r54=0; % resistencia de isolamento do carril +
resistencia de postes em paralelo na seccao de linha
r55=rint5; % valor ja considerado em rint5

Rg=[r11 r12 r13 r14 r15; r21 r22 r23 r24 r25; r31 r32 r33 r34 r35; r41
r42 r43 r44 r45; r51 r52 r53 r54 r55];

%% Resistencia dos eletrodos de Terra R_el
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

global R_el;

R_el=10;

%% Resistencia do CDTE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

global Rcdte_scale r_cdte;

r_cdte=sqrt((A_cdte)/pi); % raio de CDTE = r6 mas repete-se o
calculo

Rcdte_scale=(ro/(2*pi*scale))*log((8*scale)/(2*r_cdte)-1); % formula
do Paulo Almeida

%% R de um semicilindro de terra com raio=De
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Rground=ro*(scale/((pi*De^2)/2));

```


Anexo D.

Especificações e Características da Placa NI-DAQ
6259

DEVICE SPECIFICATIONS

NI 6259

M Series Data Acquisition: 32 AI, 1.25 MS/s, 48 DIO, 4 AO

The following specifications are typical at 25 °C, unless otherwise noted. For more information about the NI 6259, refer to the *M Series User Manual* available at ni.com/manuals.

Analog Input

Number of channels	16 differential or 32 single ended
ADC resolution	16 bits
DNL	No missing codes guaranteed
INL	Refer to the <i>AI Absolute Accuracy</i> section
Sample rate	
Single channel maximum	1.25 MS/s
Multichannel maximum (aggregate)	1.00 MS/s
Minimum	No minimum
Timing resolution	50 ns
Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Input coupling	DC
Input range	±0.1 V, ±0.2 V, ±0.5 V, ±1 V, ±2 V, ±5 V, ±10 V
Maximum working voltage for analog inputs (signal + common mode)	±11 V of AI GND
CMRR (DC to 60 Hz)	100 dB
Input impedance	
Device on	
AI+ to AI GND	>10 GΩ in parallel with 100 pF
AI- to AI GND	>10 GΩ in parallel with 100 pF

Figura D.1 - Especificações Placa NI DAQ-6259 1/2

Device off	
AI+ to AI GND	820 Ω
AI- to AI GND	820 Ω
Input bias current	± 100 pA
Crosstalk (at 100 kHz)	
Adjacent channels	-75 dB
Non-adjacent channels	-95 dB
Small signal bandwidth (-3 dB)	1.7 MHz
Input FIFO size	4,095 samples
Scan list memory	4,095 entries
Data transfers	
PCI/PCI Express/PXI/PXI Express	DMA (scatter-gather), interrupts, programmed I/O
USB	USB Signal Stream, programmed I/O
Overvoltage protection for all analog input and sense channels	
Device on	± 25 V for up to four AI pins
Device off	± 15 V for up to four AI pins
Input current during overvoltage condition	± 20 mA maximum/AI pin

Settling Time for Multichannel Measurements

Table 1. Settling Time for Multichannel Measurements

Range	± 60 ppm of Step (± 4 LSB for Full-Scale Step)	± 15 ppm of Step (± 1 LSB for Full-Scale Step)
± 1 V, ± 2 V, ± 5 V, ± 10 V	1 μ s	1.5 μ s
± 0.5 V	1.5 μ s	2 μ s
± 0.1 V, ± 0.2 V	2 μ s	8 μ s

Figura D.2 - Especificações Placa NI DAQ-6259 2/2

Anexo E.

Modelos do Simulink

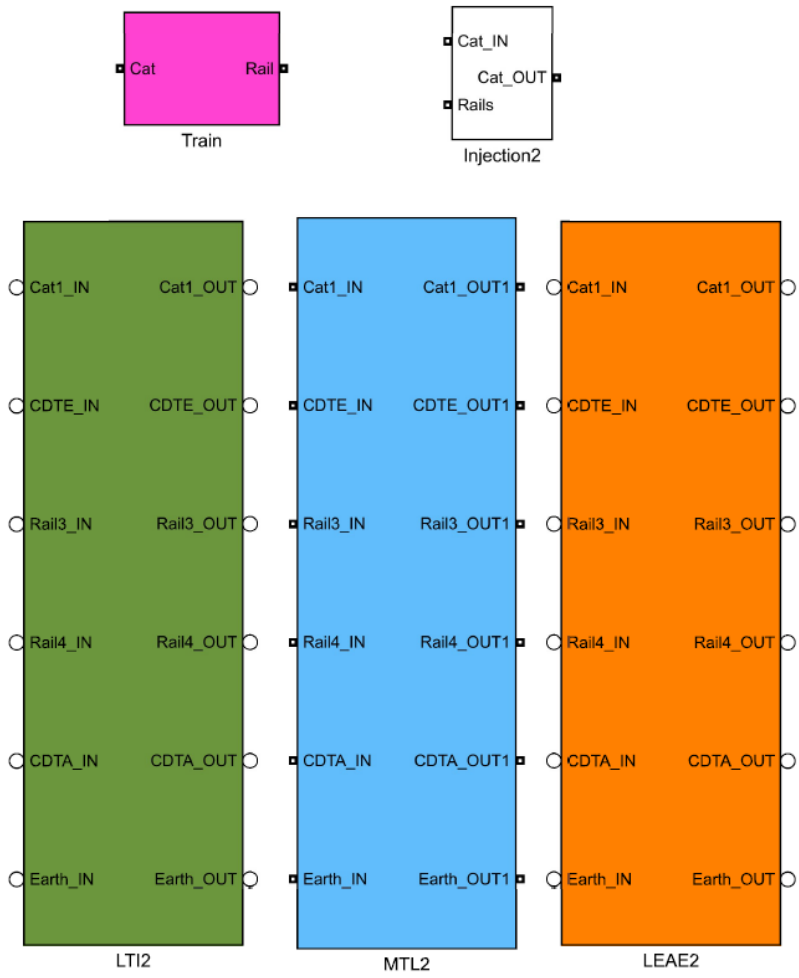


Figura E.1 – Modelos Simulink Utilizados na Simulação

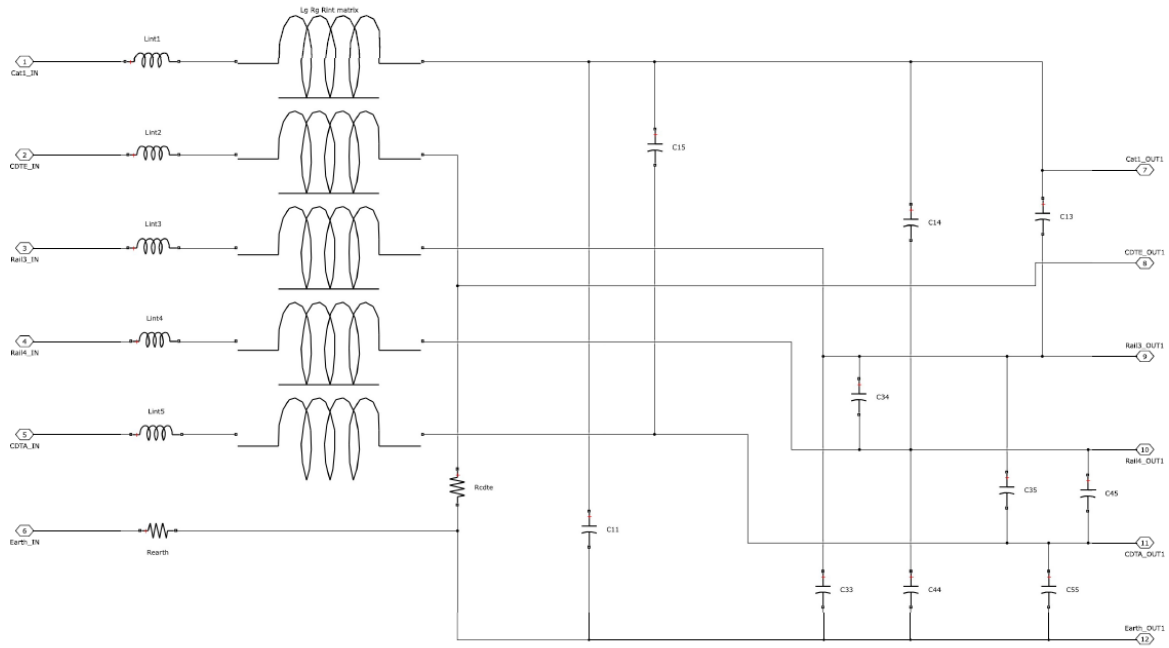


Figura E.2 – Modelo MTL

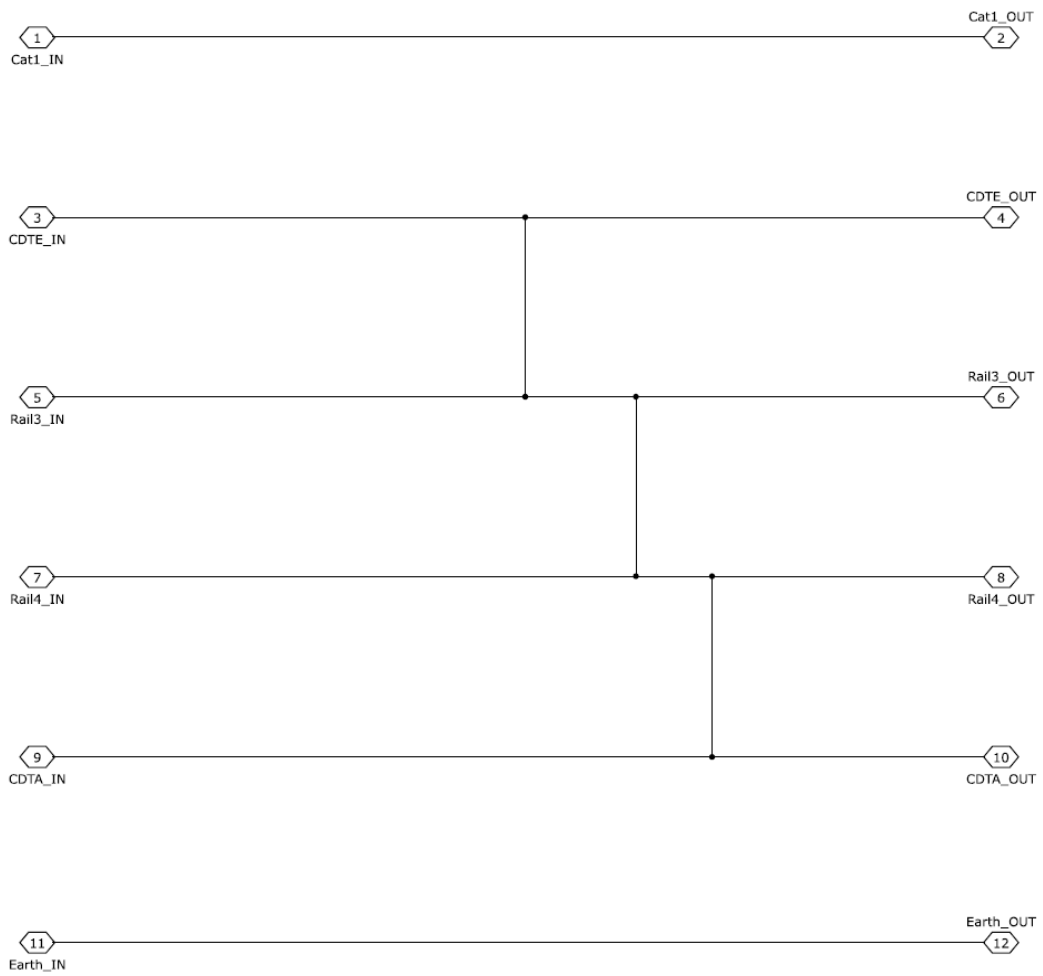


Figura E.3 – Modelo LTI

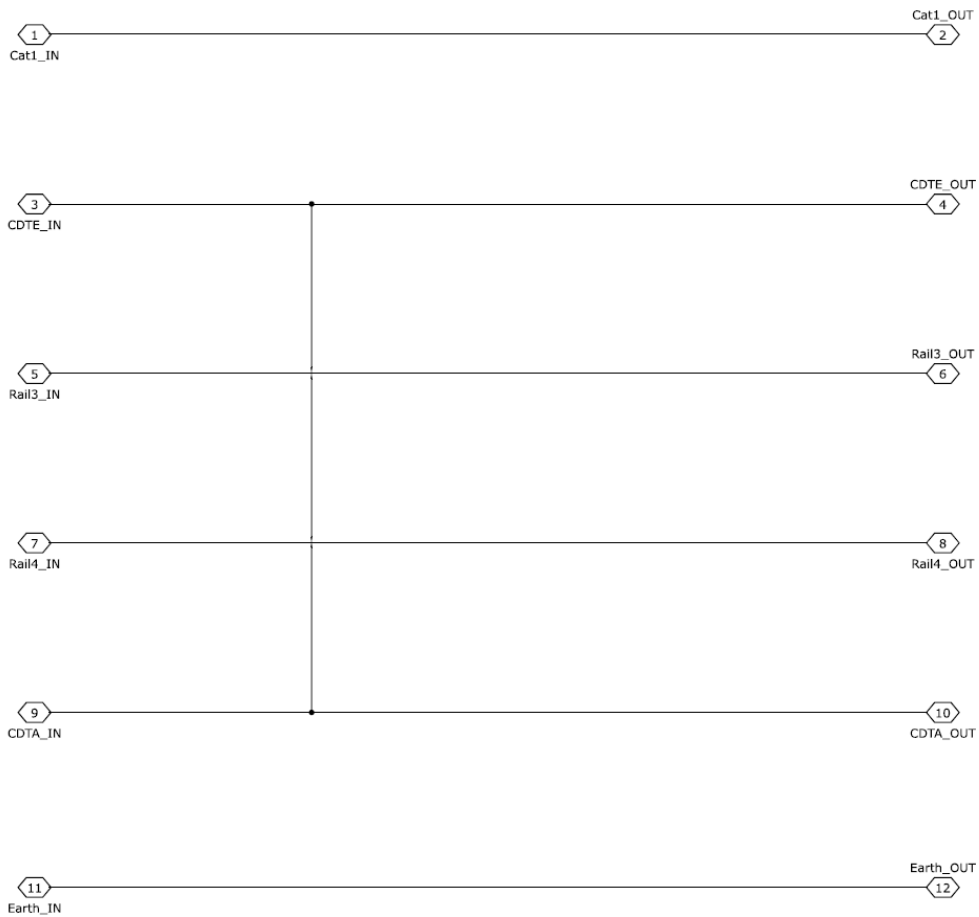


Figura E.4 – Modelo LEAE

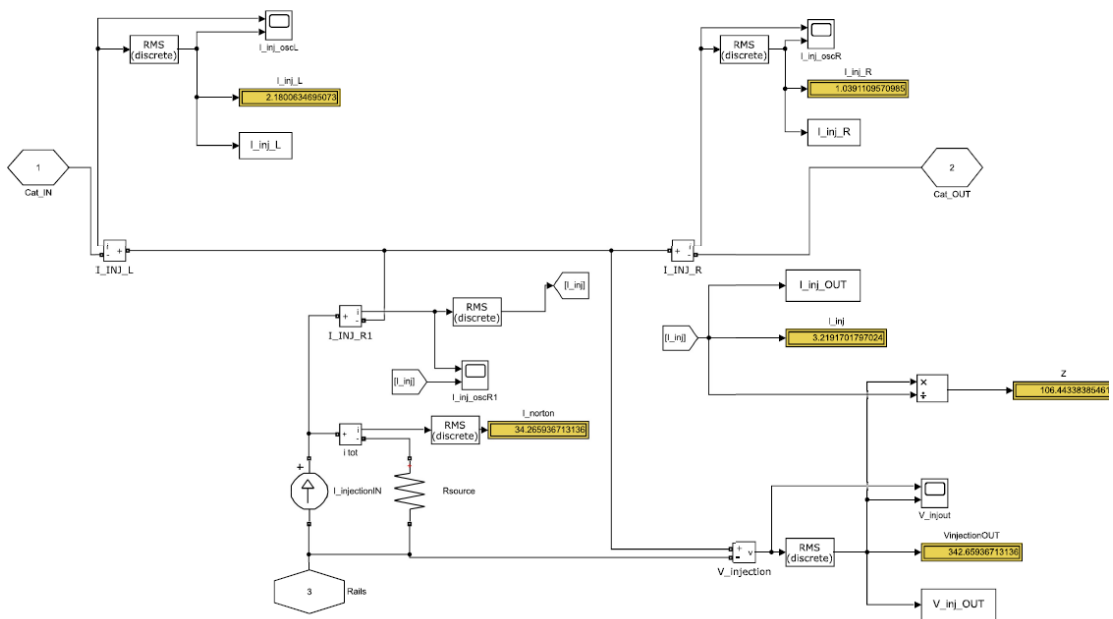


Figura E.5 – Modelo Injeção de Corrente

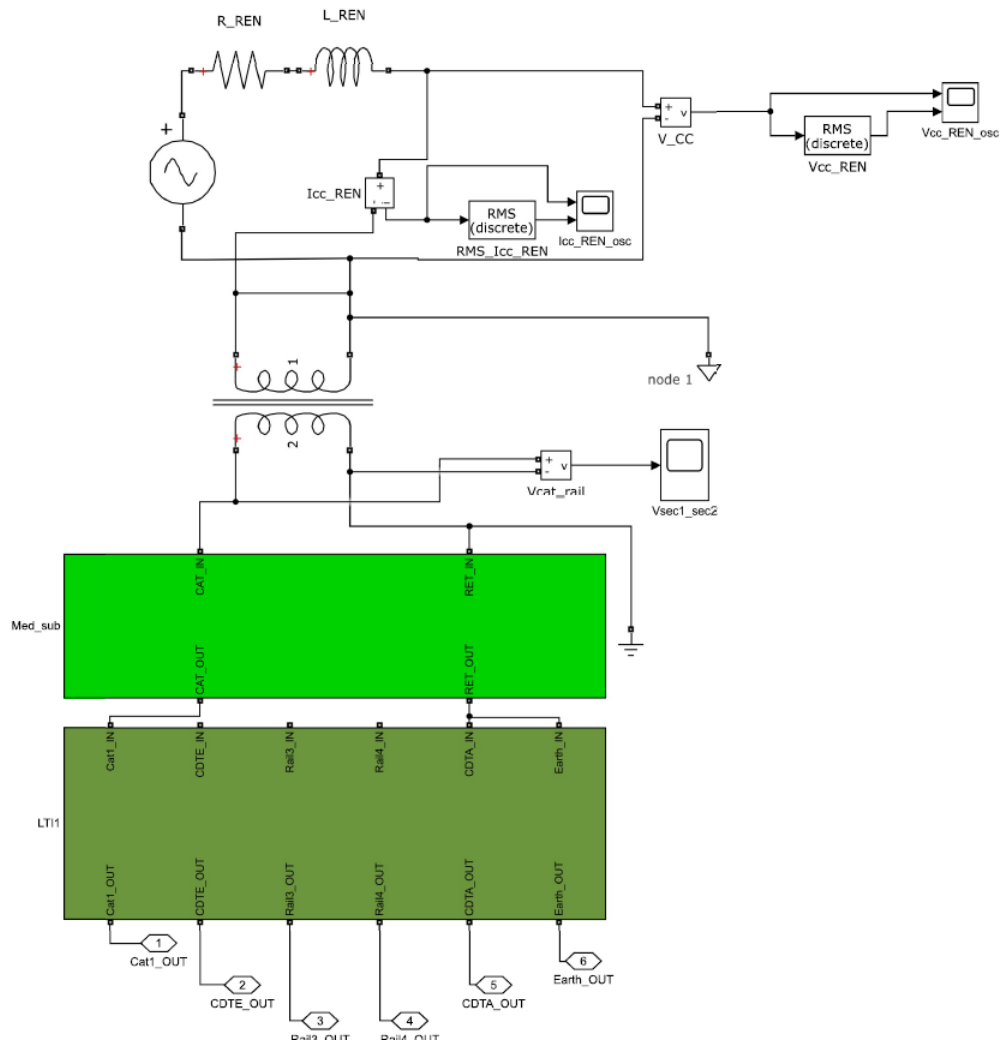


Figura E.6 – Modelo da Subestação

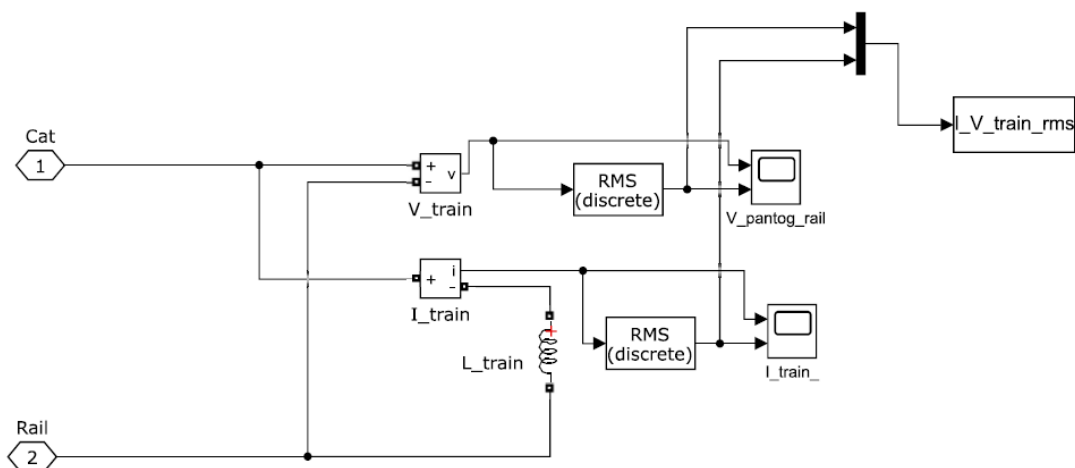


Figura E.7 – Modelo Equivalente do Comboio

Anexo F.

Matriz de Frequências de Circulações da Gestão da
Capacidade do Troço Muge-Canha

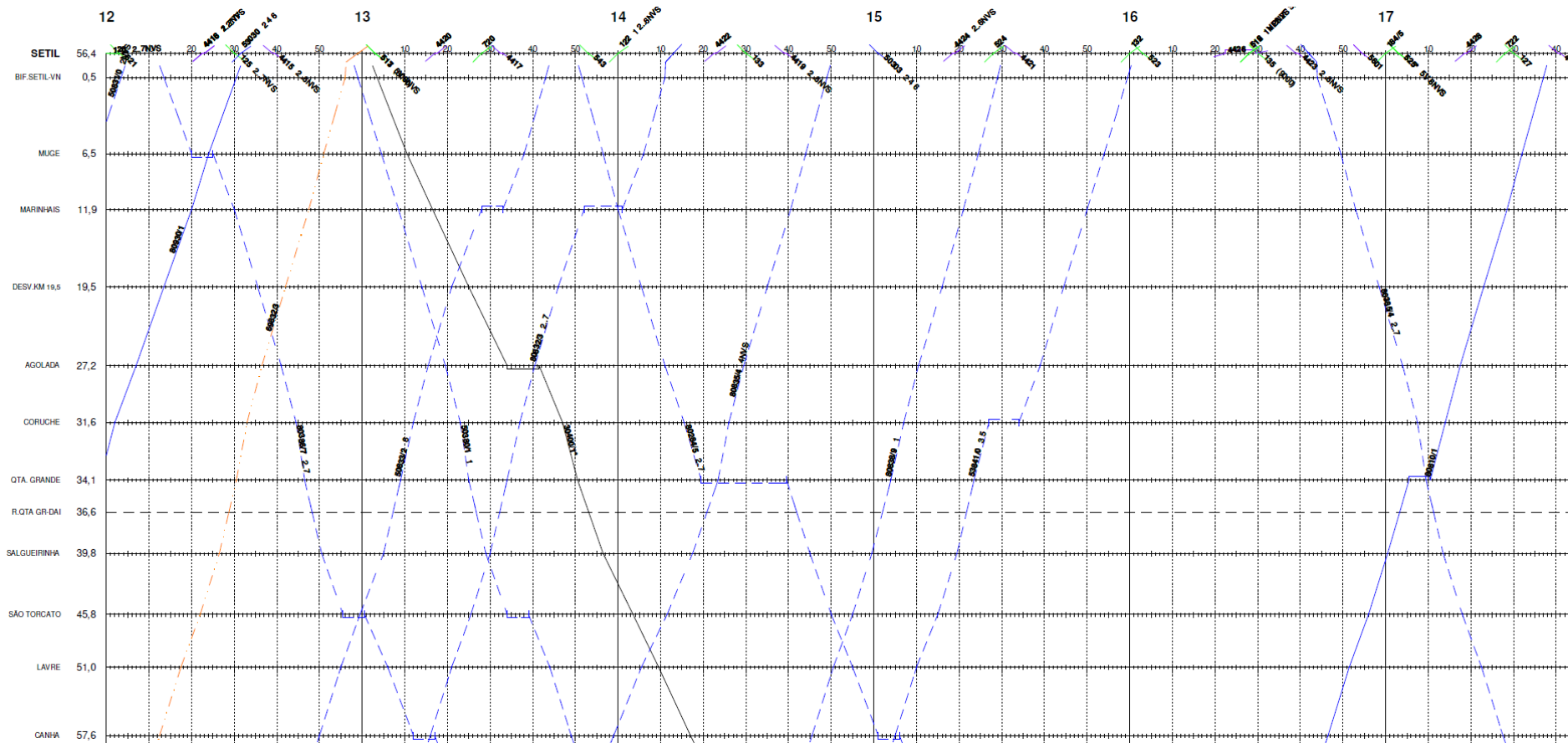


Figura F.1 – Gráfico de Circulação de Comboios na Linha de Vendas Novas (12:00H-24:00H) 1/2

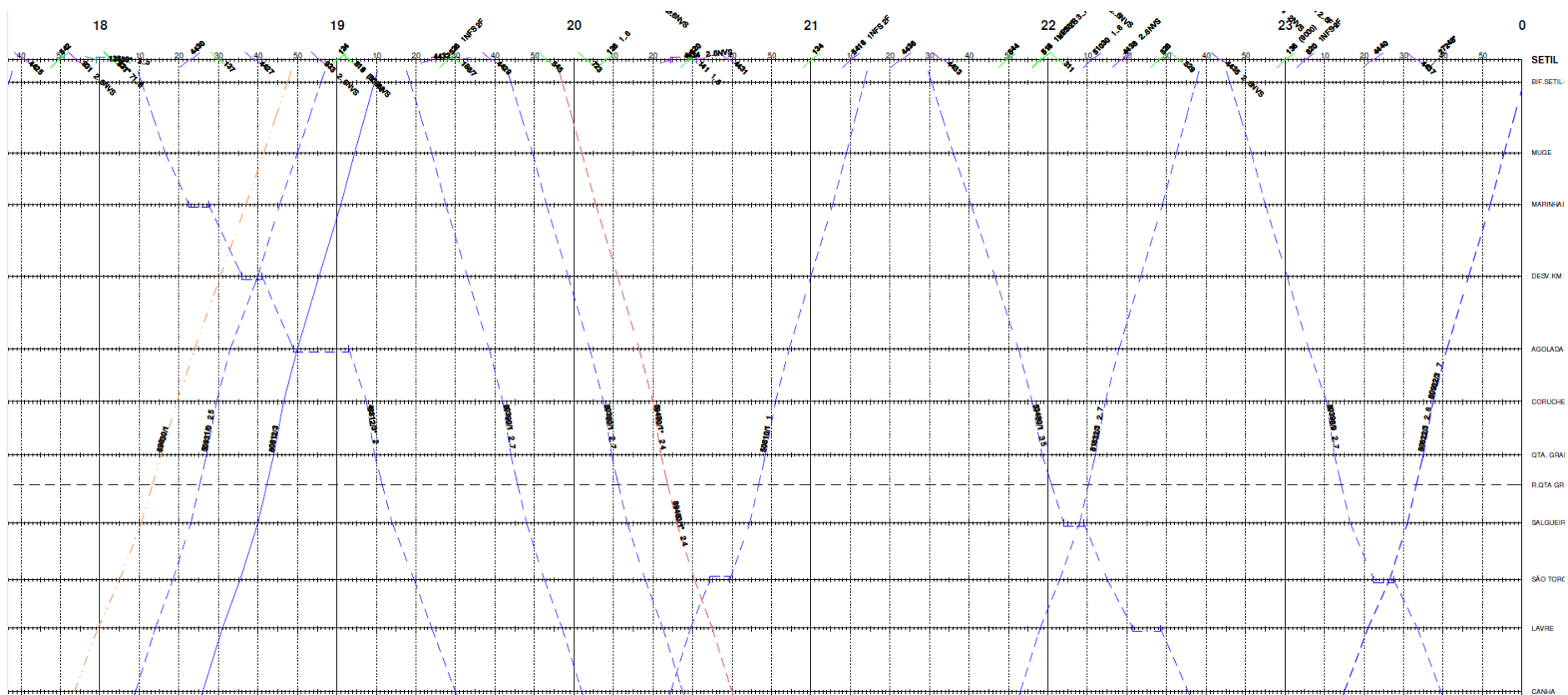


Figura F.2 – Gráfico de Circulação de Comboios na Linha de Vendas Novas (12:00H-24:00H) 2/2

Anexo G.

Relatório de Ensaios do Transformador da Subestação de Quinta Grande



RELATÓRIO DE ENSAIOS - CE: 96.1384

DESCRIÇÃO DO MATERIAL ENSAIADO:

Transformador Monofásico tipo Concêntrico, ONAN

O.F. Nº.: 54TGTG13151

TFO. Nº.: C-13151

CLIENTE: CAMINHOS DE FERRO PORTUGUESES - C.P.

ENC. : -

CARACTERÍSTICAS NOMINAIS

	AT	MT	BT	TERC
POTENCIA NOMINAL (kVA)	16200	-	16200	-
TENSÃO NOMINAL (V)	150000	-	27500	-
CORRENTE NOMINAL (A)	108.0	-	589.0	-

FREQUENCIA : 50 Hz

REGULAÇÃO DE TENSÃO: En carga na AT (23 pos.), para $\pm 11 \times 1.25\%$

RECEPCIONARIO:

Exmo.Sr.Eng. Mauricio Frederico



EFACEC

Data: 1996-08-02

CLIENTE

Data: 1996-08-02

Figura G.1 – Relatório de Ensaios do Transformador da Subestação de Quinta Grande – Excerto 1/7

RELATÓRIO DE ENSAIOS - CE: 96.1384

***** RESULTADOS DOS ENSAIOS *****

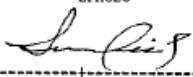
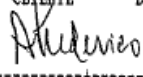
1 - NORMAS DE FABRICO:						
CEI - 76						
2 - ENSAIOS DE ROTINA:						
2.1 - Relação de Transformação em vazio e grupo de ligação:						
Os valores medidos afastam-se menos do que 0.5% dos valores nominais e o grupo de ligação verificado foi - .						
2.2 - Ensaio em vazio:						
2.2.1 - Perdas em vazio (W):						
	Garantidas	Tolerância (%)	Valor limite	Valor medido		
	13500	15	15525	13900		
2.2.2 - Intensidade de corrente (%): (Base 16.2 MVA)						
	Garantida	Tolerância (%)	Valor limite	Valor medido		
	-	-	-	0.18		
2.3 - Ensaio de rigidez dielétrica:						
O transformador foi submetido aos ensaios de rigidez dielétrica por tensão aplicada e por tensão induzida de acordo com as normas a que satisfaz.						
2.4 - Ensaio em curto-circuito: AT/BF						
2.4.1 - Perdas em curto-circuito (W):						
Base	Pos.Reg.	Garantidas	Tolerância (%)	Valor limite	Valor medido	
16.2 MVA	12	44000	15	50600	44600	
"	1	-	-	-	46200	
"	23	-	-	-	56900	
2.4.2 - Tensão de curto-circuito (%):						
Base	Pos.Reg.	Garantida	Tolerância (%)	Valores limite	Valor medido	
16.2 MVA	12	9.0	± 10	9.90 8.10	9.26	
"	1	-	± -	- -	9.93	
"	23	-	± -	- -	9.01	
EFACEC			Data: 1996-08-02		CLIENTE	
						
CE: 96.1384					Página 2 / 14	

Figura G.2 – Relatório de Ensaios do Transformador da Subestação de Quinta Grande – Excerto 2/7



RELATÓRIO DE ENSAIOS - CE: 96.1384

***** RESULTADOS DOS ENSAIOS *****

2.4.3 - Impedância de curto-circuito (Ω):

Base	Pos.Reg.	Garantida	Tolerância (%)	Valores limite	Valor medido
150000 V	12	-	-	- -	128.6
170620 V	1	-	-	- -	178.5
129370 V	23	-	-	- -	93.1

2.5 - Perdas totais (W): AT/BT

Base	Pos.Reg.	Garantidas	Tolerância (%)	Valor limite	Valor medido
16.2 MVA	12	57500	10	63250	58500

3 - CONCLUSÃO:

O transformador suportou os ensaios efectuados sem vestígios de defeito.

EFACEC Data: 1996-08-02

CLIENTE Data: 1996-08-02

Figura G.3 – Relatório de Ensaio do Transformador da Subestação de Quinta Grande – Excerto 3/7



E F A C E C, EMPRESA FABRIL DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS, S.A.
DIRECÇÃO DE GRANDES TRANSFORMADORES
DIVISÃO DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA - CONTROLE DA QUALIDADE
LABORATÓRIOS FERREIRA DIAS

RELATÓRIO DE ENSAIOS - CE: 96.1384

***** RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO *****

Pos.Reg.	Nominal	AB/ab	AT/BT	Erro (%)
1	6.204	6.211	-	0.1
2	6.136	6.143	-	0.1
3	6.068	6.075	-	0.1
4	6.000	6.006	-	0.1
5	5.932	5.938	-	0.1
6	5.864	5.870	-	0.1
7	5.795	5.801	-	0.1
8	5.727	5.733	-	0.1
9	5.659	5.665	-	0.1
10	5.591	5.596	-	0.1
11	5.523	5.528	-	0.1
12	5.455	5.460	-	0.1
13	5.386	5.391	-	0.1
14	5.318	5.323	-	0.1
15	5.250	5.255	-	0.1
16	5.182	5.187	-	0.1
17	5.113	5.118	-	0.1
18	5.045	5.050	-	0.1
19	4.977	4.982	-	0.1
20	4.909	4.913	-	0.1
21	4.841	4.845	-	0.1
22	4.773	4.777	-	0.1
23	4.704	4.709	-	0.1

Nornas: CEI - 76 Tolerância: $\pm 0.5\%$
Aparelhagem de medida: Ponte H&B METK3 cl. 0,1

EFACEC Data: 1996-08-02
[Signature]

CLIENTE Data: 1996-08-02
[Signature]

Figura G.4 – Relatório de Ensaios do Transformador da Subestação de Quinta Grande – Excerto 4/7



RELATÓRIO DE ENSAIOS - CE: 96.1384

***** ENSAIO EM VAZIO *****

Alimentação pela: BT			Frequência: 50 Hz							
Grupo de 18 MVA: 10.5/37.5 kV										
Tensão de alimentação			Intensidade da corrente nas linhas				Potência de perdas em vazio			
leit.	x	U(V)	leit.	média	x	In(A)	leit.	sona	x	kW
151.0	30000/150	30200	4.15	-	-	-	105.1	-	-	-
			-	4.15	5/5	4.15	-	105.1	0.2	21.0
137.5	30000/150	27500	1.05	-	-	-	69.5	-	-	-
			-	1.05	5/5	1.05	-	69.5	0.2	13.9
124.0	30000/150	24800	0.58	-	-	-	52.0	-	-	-
			-	0.580	5/5	0.580	-	52.0	0.2	10.4

Aparelhação de medida:

Transformador EFACEC cl. 0,2
 Voltmetro e Amperímetro H&B cl. 0,2
 Wattímetro H&B cl. 0,5

EFACEC Data: 1996-08-02 	CLIENTE Data: 1996-08-02
----------------------------------	-----------------------------------

Figura G.5 – Relatório de Ensaios do Transformador da Subestação de Quinta Grande – Excerto 5/7



RELATÓRIO DE ENSAIOS - CE: 96.1384

***** ENSAIO EM CURTO-CIRCUITO *****

1 - ENSAIO: AT/BT Alimentação pela: AT Frequência: 50 Hz Temp.do óleo: 24.9 °C

Posição do Regulador	Tensão de alimentação		U(V)	Intensidade da corrente nas linhas			Potencia de perdas em C.C.				
	leit.	x		leit.	média	x	In(A)	leit.	soma	x	kW
12	108	15000/150	10800	2.80				53.4			
				-	2.80	150/5	84.0	-	53.4	0.45	24.0
1	136	15000/150	13600	2.54				60.1			
				-	2.54	150/5	76.2	-	60.1	0.45	27.0
23	93	15000/150	9300	3.33				70.0			
				-	3.33	150/5	99.9	-	70.0	0.45	31.5

Aparelhagem de medida:

Transformador EFACEC cl. 0,2
 Voltmetro e Ampermetro H&B cl. 0,2
 Wattmetro H&B cl. 0,5

EFACEC Data: 1996-08-02

CLIENTE Data: 1996-08-02

Figura G.6 – Relatório de Ensaio do Transformador da Subestação de Quinta Grande – Excerto 6/7



RELATÓRIO DE ENSAIOS - CE: 96.1384

***** RESISTENCIAS DOS ENROLAMENTOS *****

Aparelhagem de medida: Multímetros FLUKE 8842A										Temp. do óleo: 24.6 °C
AT										
Posição do Regulador	AB			-			-			Rn (Ω)
	U (V)	I (A)	R (Ω)	U (V)	I (A)	R (Ω)	U (V)	I (A)	R (Ω)	
	a x $\frac{\quad}{\quad}$	a x $\frac{\quad}{\quad}$		a x $\frac{\quad}{\quad}$	a x $\frac{\quad}{\quad}$		a x $\frac{\quad}{\quad}$	a x $\frac{\quad}{\quad}$		
1	23.530	5.270	1.79	-	-	-	-	-	-	1.79
12	23.247	6.463	1.44	-	-	-	-	-	-	1.44
23	23.541	5.220	1.80	-	-	-	-	-	-	1.80
BT										
Posição do Regulador	ab			-			-			Rn (Ω)
	U (V)	I (A)	R (Ω)	U (V)	I (A)	R (Ω)	U (V)	I (A)	R (Ω)	
	a x $\frac{\quad}{\quad}$	a x $\frac{\quad}{\quad}$		a x $\frac{\quad}{\quad}$	a x $\frac{\quad}{\quad}$		a x $\frac{\quad}{\quad}$	a x $\frac{\quad}{\quad}$		
-	0.7034	6.464	0.0435	-	-	-	-	-	-	0.0435

EFACEC Data: 1996-08-02

CLIENTE Data: 1996-08-02

Figura G.7 – Relatório de Ensaios do Transformador da Subestação de Quinta Grande – Excerto 7/7