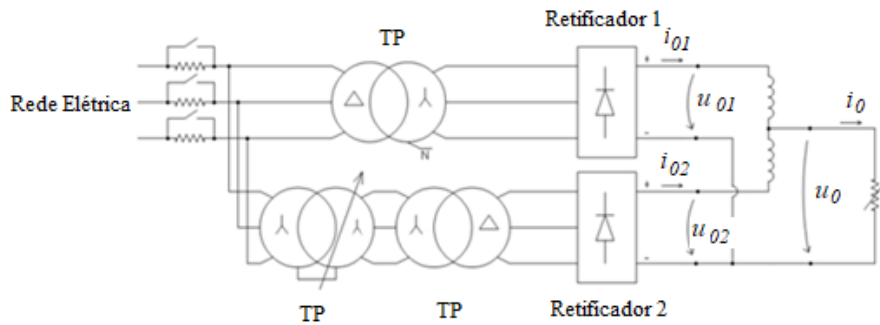


INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Eletrotécnica de Energia e Automação



Análise do Conteúdo Harmónico das Correntes em Subestações de Tração

AGEU ILÍDIO FRANCO

(Licenciado em Engenharia Industrial e Sistemas Eléctricos)

Dissertação 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

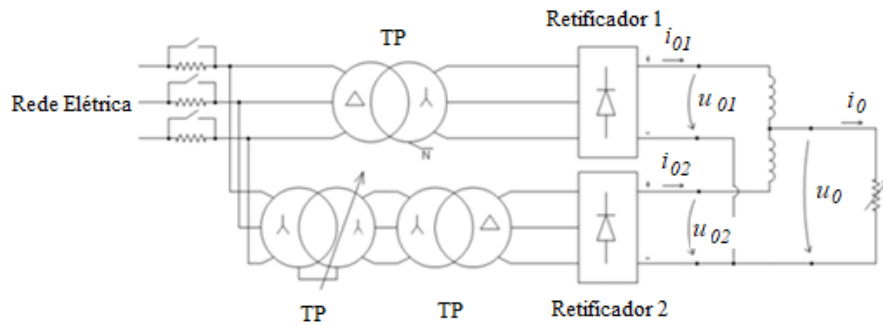
1º Vogal: Professor Doutor Filipe André de Sousa Figueira Barata

2º Vogal: Professor Doutor Paulo José Duarte Landeiro Gambôa

Abril 2020



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



Análise do Conteúdo Harmónico das Correntes em Subestações de Tração

AGEU ILÍDIO FRANCO

(Licenciado em Engenharia Industrial e Sistemas Eléctricos)

Dissertação 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

1º Vogal: Professor Doutor Filipe André de Sousa Figueira Barata

2º Vogal: Professor Doutor Paulo José Duarte Landeiro Gambôa

Abril 2020

Dissertação de Mestrado realizada sob orientação científica de:

Professor Paulo José Duarte Landeiro Gambôa

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

Professor Miguel Cabral Ferreira Chaves

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

Resumo

Pretende-se com esta dissertação de Mestrado, desenvolver um estudo sobre o conteúdo harmónico das correntes injetadas nas subestações de tração. Durante o desenvolvimento do trabalho foi feita a caracterização da rede de alimentação das locomotivas, bem como a inserção de conversores eletrónicos de potência nas suas respetivas unidades de tração, o que contribui consideravelmente para o aumento do conteúdo harmónico na rede das subestações de tração, causando assim, uma baixa qualidade da energia eléctrica e prejuízos económicos quer a montante e a jusante da rede.

O desenvolvimento matemático e respetiva simulação numérica dos modelos da subestação de tração, permite obter, de entre muitas variáveis em estudo, os espectros harmónicos das correntes. Dessa forma é possível estudar soluções de mitigação para os efeitos causados pelo conteúdo harmónico da corrente nas subestações de tração.

Para validar o modelo desenvolvido foi feita a simulação numérica do sistema da subestação de tração e a sua respetiva carga através do software de simulação *Matlab/simulink*.

Palavras-chave: Subestação de tração, locomotivas, conversores eletrónicos de potência, conteúdo harmónico da corrente.

Abstract

This Master's dissertation intends to develop the study of the harmonic content of currents injected in the traction substations. During the development of the work, the characterization of the locomotive feed network were made, as well the insertion of electronic power converters in their respective traction units, what is considered considerable for the increase of the harmonic content in traction substations, thus causing poor quality of electricity and economic losses even upstream and downstream of the power grid.

The mathematical development and respective numerical simulation of the traction substation models, allow to obtain among many variables under study, the harmonic spectrum of the currents. In this way it is possible to study mitigation solutions for the effects caused by the harmonic content of the current in the traction substations.

To validate the developed model were made the simulation of the traction substation system and its load through *Matlab / simulink* software.

Keywords: Traction substation, locomotives, electronic power converters, harmonic current content.

Agradecimentos

Antes de tudo, agradeço ao meu Senhor Jesus Cristo, pelo que tudo foi possível por sua infinita graça.

Aos meus orientadores Paulo Gambôa e Miguel Chaves, por toda força e coragem dada desde o início da proposta para o tema desta dissertação.

Aos meus pais Ilídio Franco e Paula Quipanguila.

À minha esposa Alkénia Franco, por sua forma inspiradora e encorajadora, aos meus filhos a quem dedico esta dissertação.

Ao meu Padrinho Elísio Cabrita, por toda atenção prestada e incentivo para continuidade e realização do curso.

Aos meus familiares e amigos que sempre me deram toda a força e coragem.

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.

Ao Grupo Disciplinar de Instalações Elétricas pela disponibilização e utilização do Analisador de Qualidade de Energia Elétrica “TOPAS 1000”, bem como a colaboração do Técnico Superior do Laboratório de Utilização de Energia e Sala de Projeto César Ferrolho.

Agradeço ao Metropolitano de Lisboa na pessoa do Engenheiro Tomé Vieira pela informação e documentação prestada.

A todos aqueles que de alguma forma, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos, o meu muito obrigado

Lista de Acrónimos

AT – Alta Tensão

AC – Grandeza alternada (*Alternate Current*), não necessariamente sinusoidal, mas cuja componente sinusoidal fundamental é a parte de interesse essencial

BT – Baixa Tensão

DC – Grandeza contínua ou apenas unidirecional (*Direct Current*), não necessariamente constante, mas cujo valor médio é a componente de interesse essencial

GTO – Tiristor que pode ser colocado ao corte por um sinal de comando aplicado à porta (*Gate Turn-off Thyristor*)

IGBT – Transistor Bipolar de Porta Isolada (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)

IEC – International Electrotechnical Commission

MT – Média Tensão

MAT – Muito Alta Tensão

MOSFET – Transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*)

SST – Subestação de Tração (Traction Substation)

Lista de Símbolos

a_h – Coeficiente de Fourier para a função seno

b_h – Coeficiente de Fourier para a função co-seno

$F_{Tremor\ u_o}$ – Fator de tremor da tensão u_o

h – Número inteiro correspondente à ordem da harmónica de tensão ou corrente

i_d – Valor instantâneo da corrente retificada (A)

i_o – Valor instantâneo da corrente na bobina interfásica (A)

i'_d – Valor instantâneo da corrente referida ao retificador 1 (A)

i''_d – Valor instantâneo da corrente referida ao retificador 2 (A)

I_h - Valor eficaz para a harmónica de corrente de ordem h (A)

I_1 – Valor eficaz da componente fundamental da corrente ($h=1$) (A)

I_{RMS} – Valor eficaz da corrente (A)

I_d – Valor médio da corrente referida na carga (A)

I'_d – Valor médio da corrente retificada referida à saída do retificador 1 (A)

I''_d – Valor médio da corrente retificada referida à saída do retificador 2 (A)

km – Unidade quilometro

m – Unidade metro

t – Variável tempo (s)

T_{u_d} – Período da tensão u_d na carga (s)

THD – Taxa de distorção harmónica total (*Total Harmonic Distortion*) (%)

THD_i – Taxa de distorção harmónica total da corrente (%)

THD_v – Taxa de distorção harmónica total da tensão (%)

TDD – Taxa de distorção da demanda (*Total Demand Distortion*) (%)

u_o – Valor instantâneo da tensão na bobina interfásica (V)

u_{oav} – Valor médio (componente contínua) (V)

u_d – Valor instantâneo da tensão retificada na carga (V)

u'_d – Valor instantâneo da tensão retificada referida ao retificador 1 (V)

u''_d – Valor instantâneo da tensão retificada referida ao retificador 2 (V)

U_d – Valor médio da tensão retificada na carga (V)

U'_d – Valor médio da tensão referida à saída do retificador 1 (V)

U''_d – Valor médio da tensão referida à saída do retificador 2 (V)

U_1 – Valor eficaz da componente fundamental da tensão ($h=1$) (V)

U_h – Valor eficaz para a harmónica da tensão de ordem h (V)

ω – Frequência angular (rad/s)

φ_h – Angulo de fase correspondente a harmónica h (rad)

Ω - Resistência eléctrica (ohm)

Índice

Lista de Acrónimos.....	vii
Lista de Símbolos	viii
Índice de Tabelas	xiv
Índice de Figuras	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1. Enquadramento e Motivação	3
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Organização e Estrutura do Documento	5
2. ESTADO DA ARTE	9
2.1. Tração Elétrica Ferroviária	9
2.2. Início do Sistema Ferroviário em Portugal	11
2.2.1. Constituição do Metropolitano de Lisboa	14
2.3. Origem do Sistema Ferroviário em Angola.....	18
2.4. Sistema de Alimentação de Tração em Corrente Alternada	21
2.4.1. Sistema de Alimentação Monofásico 1X25 kV	22
2.4.2. Sistema de Alimentação Bifásica 1X25 kV	23
2.4.3. Sistema de Alimentação Trifásica 1X25 kV – Ligação em V.....	24
2.4.4. Sistema de Alimentação Elétrica 2X25 kV	24
2.5. Sistema de Alimentação Elétrica de Tração em Corrente Contínua.....	26
3. IMPACTO DO CONTEÚDO HARMÓNICO DA CORRENTE ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO.....	31
3.1. Impacto do Conteúdo Harmónico da Corrente na Rede Elétrica.....	31
3.2. Classificação e Quantificação da Distorção Harmónica.....	32
3.3. Avaliação da Distorção Harmónica da Corrente no Sistema Elétrico	35
3.4. Efeitos das Harmónicas	40
4. MODELO DO RETIFICADOR TRIFÁSICO EM PONTE NÃO CONTROLADO E DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA	45

4.1.	Retificador Trifásico em Ponte não Controlado	45
4.2.	Modelo do Retificador Dodecafásico não Controlado.....	48
4.3.	Esquema Geral de Ligação do Modelo do Retificador não Controlado	50
4.4.	Ondulador de Tensão Trifásico em Ponte.....	52
4.5.	Sistema de Acionamento com Máquinas Assíncronas Trifásicas	52
4.6.	Modelo do Sistema Elétrico da Subestação de Tração	56
4.7.	Modelo do Transformador Trifásico.....	56
4.8.	Modelo da Linha de Transmissão (terceiro carril).....	57
4.9.	Resistência Equivalente da Carga Ro	57
5.	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAIS	61
5.1.	Modelo de Simulação Numérica e os seus Parâmetros	61
5.1.1.	Resultados da Simulação Numérica com os Parâmetros do Metro.....	65
5.1.2.	Implementação Laboratorial.....	71
5.2.	Comparação entre Resultados de Simulação e Experimentais	75
6.	CONCLUSÕES	93
6.1.	Conclusões Gerais.....	93
6.2.	Desenvolvimentos Futuros	95
	REFERÊNCIAS	98
	ANEXOS.....	102
	Anexo A - Dados técnicos fornecidos pelo Metropolitano de Lisboa da unidade de tração elétrica ML99.....	102
	Anexo B – Simulação Numérica para Validação da Implementação Laboratorial..	103
	Anexo C – Simulação Numérica para Ensaio com os Parâmetros Reais do Metro .	104
	Anexo D – Montagem do Protótipo em Laboratório.....	105
	Anexo E – Cálculo da Resistência da Carga Ro.....	106
	Anexo F – Cálculos da <i>THD</i> , <i>TDD</i> e <i>Ftremor</i>	107

Índice de Tabelas

Tabela 3. 1 - Classificação das harmónicas [21].	32
Tabela 3. 2 - Limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição geral [26].	39
Tabela 3. 3 - Valores máximos de distorção harmónica da tensão [27].	40
Tabela 5. 1 – Parâmetros da rede de energia eléctrica.	62
Tabela 5. 2 – Parâmetros do transformador de potência [31].	62
Tabela 5. 3 – Parâmetros da bobina interfásica [31].	64
Tabela 5. 4 – Parâmetros da linha 3º carril [31].	64
Tabela 5. 5 – Parâmetros da carga.	64
Tabela 5. 6 – Parâmetro da bobina interfásica.	74
Tabela 5. 7 – Comparação de resultados.	89

Índice de Figuras

Figura 2. 1 Carro elétrico da linha de Gross- Lichterferd [1].....	10
Figura 2. 2 – Mapa dos caminhos de ferro portugueses, janeiro de 1895 [4].....	12
Figura 2. 3 – Comboios CP e Alfa Pendular [5].....	14
Figura 2. 4 – Terminal e oficina do Metro Sete-rios, 1957 – 1977 [6].	15
Figura 2. 5 – Carruagem Sorefame ML 7 e seu interior [6].	15
Figura 2. 6 – Estação do Restauradores [6].	17
Figura 2. 7 – Diagrama atual da rede do Metropolitano de Lisboa [6].	18
Figura 2. 8– Caminhos de ferro de Angola e suas locomotivas [7].	20
Figura 2. 9 Rede ferroviária Angolana [8].	20
Figura 2. 10 – Exemplo do sistema de alimentação elétrica para uma SST [9].	
Figura 2. 11– Classificação dos níveis de tensão usados na eletrificação ferroviária na Europa [9].	21
Figura 2. 12 - Representação da catenária e o pantógrafo [10].	22
Figura 2. 13 - Representação do sistema monofásico [12].....	23
Figura 2. 14 - Representação da configuração para alimentação bifásica [13].	23
Figura 2. 15 - Representação ligação em V [15].	24
Figura 2. 16 - Diagrama do autotransformador de tração [16].	
Figura 2. 17 - Autotransformador de tração [17].	25
Figura 2. 18 - Representação do sistema de alimentação 2x25kV [18].	25
Figura 2. 19 – Sistema de retificação AC – DC [18].....	26
Figura 2. 20 – Valores habituais para a distância entre SST do tipo DC [18].....	26
Figura 2. 21 – Distância e sentidos da corrente entre SST DC [18].....	27
Figura 2. 22 - Sistema de alimentação do 3º carril [19].	27
Figura 3. 1 - Evolução temporal da corrente distorcida, componente fundamental e sua terceira harmónica [20].....	32
Figura 3. 2 – Forma da corrente em regime permanente de entrada na fase do retificador trifásico em ponte com carga RL [23].	35
Figura 3. 3 – Esquema de princípio do retificador trifásico em ponte não controlado com carga RL [23].....	36

Figura 3. 4 – Espectro de amplitudes das harmónicas a entrada do retificador [23].	37
Figura 4. 1 - Retificador trifásico em ponte, não controlado com carga R-L [29].	45
Figura 4. 2 - Diagrama de funcionamento do circuito de retificação trifásico em ponte não controlado carga R-L [29].	47
Figura 4. 3 – Exemplo com deformação da tensão entre fases causada pela comutação dos díodos num retificador trifásico em ponte não controlado [29].	48
Figura 4. 4 - Modelo da associação de duas pontes trifásicas em paralelo com o transformador [29].	49
Figura 4. 5 - Formas de onda da tensão e corrente retificada em regime permanente [18].	49
Figura 4. 6 – Vetores com o desfasamento das tensões aplicadas nos retificadores [29].	49
Figura 4. 7 - Esquema de ligações do modelo do retificador em paralelo utilizando bobina interfásica [18].	50
Figura 4. 8 - Forma da tensão retificada [29].	50
Figura 4. 9 – Ondulador de tensão trifásico em ponte [29].	52
Figura 4. 10 – Esquema equivalente por fase do motor assíncrono trifásico [29].	53
Figura 4. 11 – Aspeto típico do diagrama de rendimento de um motor de rotor em gaiola [29].	55
Figura 4. 12 - Modelo do sistema elétrico da SST.	56
Figura 4. 13 – Modelo do transformador com ligações Y(Y D).	56
Figura 4. 14 – Modelo de simulação da linha do Metro.	57
Figura 5. 1 - Diagrama global do modelo da subestação de tração	61
Figura 5. 2 – Representação do subsistema da rede de energia elétrica.	62
Figura 5. 3 – Parâmetros dos retificadores trifásicos em ponte não controlados [32].	63
Figura 5. 4 – Representação da bobina interfásica.	63
Figura 5. 5 – Modelo da linha de Metro.	64
Figura 5. 6 – Modelo equivalente da carga.	64
Figura 5. 7 – Corrente de entrada do primário i_p em regime permanente do transformador com ligação em triângulo.	65
Figura 5. 8 – Tensão u_a e corrente i_a numa fase em regime permanente de entrada do retificador trifásico.	65

Figura 5. 9 – Tensão simples u_a e correntes i_a e i_b de entrada em regime permanente nos retificadores.	66
Figura 5. 10 – Evolução temporal da composição das correntes i_a e i_b de entrada dos retificadores.	66
Figura 5. 11 – Evolução temporal da tensão u_{0a} e corrente de saída i_{0a} do retificador trifásico.	67
Figura 5. 12 – Evolução temporal em regime permanente das tensões u_{0a} e u_{0b} e correntes i_{0a} e i_{0b} sobrepostas de saída dos retificadores trifásicos.	67
Figura 5. 13 – Evolução temporal em regime permanente da tensão u_0 e corrente i_0 na carga.....	68
Figura 5. 14 – Espectro da corrente i_{p1} na entrada do transformador com ligação em triângulo.....	69
Figura 5. 15 – Espectro da tensão simples u_1 de entrada do retificador trifásico em ponte.	69
Figura 5. 16 – Espectro de tensão u_{o1} à saída do retificador trifásico em ponte.	70
Figura 5. 17 – Espectro da corrente i_{a1} de entrada do retificador trifásico.....	71
Figura 5. 18 – Esquema de geral de ligação da Subestação de Tração.	72
Figura 5. 19 – Autotransformador trifásico.	72
Figura 5. 20 – Transformador trifásico de ligação ao retificador 1. Figura 5. 21 – Transformador trifásico de ligação ao retificador 2.	73
Figura 5. 22 – Retificadores trifásicos em ponte não controlados.	73
Figura 5. 23 – Bobina interfásica.	74
Figura 5. 24 – Resistência usada como carga.	74
Figura 5. 25 – Osciloscópio digital.	75
Figura 5. 26 – Analisador de qualidade de energia, modelo TOPAS 1000.	75
Figura 5. 27 – Representação dos parâmetros da rede elétrica para validação em simulação numérica.	76
Figura 5. 28 – Parâmetros da rede de energia elétrica de alimentação à SST.	76
Figura 5. 29 – Representação dos parâmetros do transformador.	77
Figura 5. 30 – Parâmetros do transformador da SST.	77
Figura 5. 31 – Parâmetros dos elementos constituintes do retificador trifásico em ponte.	78
Figura 5. 32 – Parâmetros para cálculo da carga equivalente R_{eq}	78

Figura 5. 33 - Corrente de entrada i_{pa} do primário do transformador obtida por: a) Simulação; b) Experimental.	79
Figura 5. 34 – Tensão u_a e corrente i_a de entrada do retificador obtidas por: a) Simulação; b) Experimental.	79
Figura 5. 35 – Tensão u_a e correntes i_a e i_b de entrada dos retificadores 1 e 2 obtidas por: a) Simulação; b) Experimental.	80
Figura 5. 36 – Composição da corrente i_a e i_b de entrada dos retificadores 1 e 2 obtida por: a) Simulação; b) Experimental.	80
Figura 5. 37 – Tensão u_{o1} e corrente i_{o1} de saída do retificador obtidas por: a) Simulação; b) Experimental.	81
Figura 5. 38 – Tensões (u_{o1} , u_{o2}) e correntes (i_{o1} , i_{o2}) de saída dos retificadores obtidas por: a) Simulação; b) Experimental.	82
Figura 5. 39 – Tensão u_o e corrente i_o na carga obtidas por: a) Simulação; b) Experimental.	82
Figura 5. 40 – Espectro de tensão simples u_a de entrada do retificador trifásico 1 (Ensaio experimental).	83
Figura 5. 41 – Espectro de tensão simples u_a na entrada do retificador trifásico 1 (Ensaio de simulação).	84
Figura 5. 42 – Espectro de tensão u_{o1} na saída do retificador trifásico 1 (Ensaio experimental).	84
Figura 5. 43 – Espectro de tensão u_{o1} na saída do retificador trifásico 1 (Ensaio de simulação).	85
Figura 5. 44 – Espectro de corrente i_a de entrada do retificador trifásico 1 (Ensaio experimental).	86
Figura 5. 45 – Espectro da corrente i_a de entrada do retificador trifásico 1 (Ensaio de simulação).	86
Figura 5. 46 – Espectros de correntes i_a e i_b de entrada dos retificadores 1e 2 (Ensaio experimental).	87
Figura 5. 47 – Espectros de corrente i_{pa} de entrada do primário do transformador com ligação em estrela (Ensaio experimental).	88
Figura 5. 48– Espectros de corrente i_{pa} de entrada do primário do transformador com ligação em estrela (Ensaio de simulação).	88

Capítulo 1

Introdução

O presente capítulo descreve a motivação que levou à realização desta dissertação, bem como os objetivos pretendidos e sua respectiva organização.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e Motivação

A mobilidade de pessoas bens e serviço têm vindo a desenvolver-se em toda a parte do mundo, exigindo um maior investimento quer em infraestruturas ferroviárias bem como em outros meios de transporte. Tem-se verificado nos últimos tempos um crescente aumento de investimentos no sector dos transportes ferroviários nos Países do continente Africano comparativamente ao continente Europeu pelo facto de num passado o continente africano ter sido bastante assolado por vários conflitos quer político, social e armado. Sendo visível o aumento populacional em determinadas regiões do continente tal como África, existindo assim toda uma necessidade de criação de políticas que visam a facilidade de acesso aos meios de transportes. Os transportes ferroviários têm sido uma ótima opção de soluções a implementar e facilitar a circulação de pessoas e bens, contribuindo por um lado para a componente social e por outro para o alavancamento da economia dos países bem como na geração de novos postos de trabalho.

A utilização do sistema de transporte ferroviário elétrico tem um impacto bastante reduzido na emissão de gases poluentes no ecossistema, contribuindo para um ambiente sustentável. Um projeto ferroviário é um sistema incorporando diversos componentes para efetivação e funcionamento do mesmo, sendo assim para que haja o deslocamento de um ponto para outro é necessário a existência das subestações de tração, fornecendo assim a corrente de tração elétrica para circulação das locomotivas.

Os sistemas ferroviários elétricos consistem de conversores eletrónicos de potência quer nas subestações de tração como incorporadas nas locomotivas. O uso destes componentes de eletrónica de potência geram uma distorção do sinal fundamental da corrente causando a existência de conteúdos harmónicos no sistema elétrico, levando a uma baixa eficiência das locomotivas bem como danos avultados em todo sistema elétrico. De forma a mitigar tais danos quer de natureza técnica e conseqüentemente económica é necessário a análise do conteúdo harmónico das correntes nas subestações de tração.

1.2. Objetivos

A presente dissertação de Mestrado tem por objetivo inicial fazer o estudo teórico, obtenção de modelos matemáticos e simulação numérica do conteúdo harmónico das correntes em subestações de tração. Este estudo contou com a utilização do modelo do transformador de potência, retificador dodecafásico e bobina interfásica.

Foi feito numa primeira fase uma abordagem sobre a tração eléctrica bem como a história cronológica sobre o surgimento e uso da linha férrea eletrificada. São ainda descritas as etapas do início do sistema ferroviário em Portugal e em Angola, tal como é caracterizada e descritas as várias formas sobre os sistemas de alimentação das locomotivas.

Na fase seguinte é feita uma abordagem relativamente ao conteúdo harmónico da corrente na rede eléctrica onde são apresentadas as suas classificações bem como os limites de distorção estabelecidos pelas várias normas. De modo a implementar a simulação numérica em *Matlab/Simulink* foi feita a escolha do retificador trifásico em ponte não controlado de forma a obter a retificação do sinal de entrada (tensão).

Na última fase é realizada a implementação laboratorial que tem como base a utilização de um modelo experimental, constituído por um autotransformador trifásico que serviu para a alimentação de dois transformadores trifásicos, retificadores trifásicos em ponte não controlados, bobina interfásica e um reóstato que serviu como modelo da carga. A validação destes resultados experimentais obtidos, foi realizada com recurso ao *software Matlab/Simulink* (simulação numérica dos modelos matemáticos) e dados do Analisador de Qualidade de Energia Eléctrica.

1.3. Organização e Estrutura do Documento

A escrita desta dissertação de Mestrado encontra-se dividida em 6 capítulos, referências bibliográficas e anexos.

O primeiro capítulo é referente à introdução ao tema abordado onde é apresentado o enquadramento a motivação, os objetivos da dissertação a organização e estrutura do documento.

Quanto ao segundo capítulo, é relativo ao estado da arte, onde é descrito a história sobre o início do uso das locomotivas elétricas, sistema ferroviário em Portugal e em Angola bem como são apresentados os sistemas de alimentação de uma subestação de tração.

Relativamente ao terceiro capítulo, é abordado o impacto do conteúdo harmónico da corrente elétrica bem como a sua classificação.

No quarto capítulo, é apresentado o modelo do retificador trifásico em ponte, modelo do transformador bem como o esquema geral da subestação de tração elétrica.

No quinto capítulo, é apresentado o diagrama global do modelo da subestação de tração, os parâmetros utilizados para as simulações numéricas e experimentais e em seguida são apresentados os resultados obtidos.

Relativamente o sexto capítulo, são apresentadas as conclusões gerais de toda a dissertação de Mestrado e perspectivas de desenvolvimentos futuros do tema descrito e estudado.

Capítulo 2

Estado da Arte

O presente capítulo descreve a evolução do sistema de tração elétrico ferroviário bem como os tipos de subestação de tração existente.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Tração Elétrica Ferroviária

A locomoção em que a força motriz é obtida através de um motor elétrico é denominado tração elétrica. Existe uma grande variedade de sistemas de tração elétrica em todo mundo e construídos de acordo ao tipo de ferrovia, localização e tecnologia disponível durante sua instalação.

A aplicação da eletricidade para fornecimento da tração elétrica teve seu início no ano de 1879, logo nos primórdios da exploração industrial. Neste ano Werner Von Siemens apresentou na exposição internacional de Berlim um pequeno trator, acionado por um motor elétrico de corrente contínua, que rebocou três pequenos vagões constituídos por bancos de seis lugares montados sobre rodas, e que podiam transportar 18 passageiros. O conjunto deslocava-se sobre carris, numa via circular de 300 metros de comprimento, com uma velocidade de 12 km/h. A alimentação era feita por um carril central em corrente contínua, com uma tensão de 150 V, sendo o circuito de retorno constituído pelos carris de guiamento [1].

Em 1881 foi inaugurada a linha de Gross-Lichterfelde, perto de Berlim, que é a primeira linha férrea eletrificada com 1,2 km. Tinha carris com uma bitola de 1 metro, colocados 0,2 metro acima do solo. Os carris serviam de sistema transportador da energia elétrica, que era produzida por duas máquinas Siemens numa pequena central térmica situada a 500 metros da estação do caminho de ferro. O carro elétrico que circulava nesta linha, podia transportar 26 pessoas com uma velocidade normal de 20 km/h, mas podendo atingir os 40 km/h em percurso plano sem curvas e com todos os passageiros. O motor elétrico (máquina de corrente contínua Siemens com excitação ligada do tipo série) acionava os dois eixos por meio de roldanas e de lâminas de aço [1].

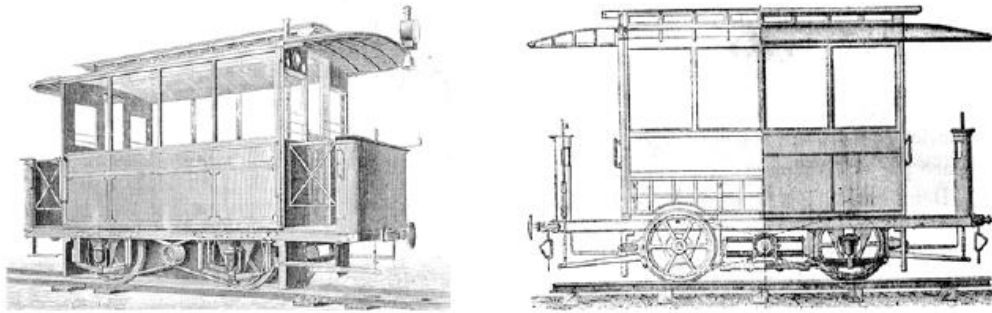


Figura 2. 1 Carro elétrico da linha de Gross- Lichterfelde [1].

O comboio elétrico da empresa Siemens & Halske, para além de constituir na sua época uma mera demonstração das possibilidades de utilização da energia elétrica, apresentou desde logo, todo o conjunto de problemas inerentes à tração elétrica tais como o problema da alimentação em energia do veículo motor, problema da disponibilidade e controlo da força motriz e todo conjunto de problemas inerentes à exploração deste novo sistema de transporte [1].

A primeira locomotiva elétrica em corrente alternada foi desenvolvida por Charles Brown que trabalhou para Oerlikon, Zurich em 1891. Brown havia demonstrado a transmissão de potência a longa distância para um sistema trifásico em corrente alternada entre a central hidroelétrica em Lauffen am Neckar e a estação ferroviária em Frankfurt am Main West à uma distância de 280 km. Brown usando da experiência adquirida enquanto trabalhador (design) da Jean Heilmann nas locomotivas elétricas a vapor, verificou que os motores trifásicos tinham uma relação de maior potência-peso do que os motores de corrente contínua e por causa da ausência do comutador [2].

No final do século dezanove a situação da tração elétrica atingiu outra dimensão, com a aplicação deste princípio, permitiu o surgimento de carros de tração elétrica e troleicarros bem como a sua expansão para vários países.

Nos últimos 20 anos tem-se verificado um rápido crescimento no desenvolvimento da tração ferroviária. Isto ocorreu em paralelo com o desenvolvimento de equipamentos de eletrónica de potência em especial os semicondutores de potência dos conversores e microprocessadores [3].

2.2. Início do Sistema Ferroviário em Portugal

Em 28 de Outubro de 1856, foi inaugurado o primeiro troço ferroviário em território português. Ligava a cidade de Lisboa à povoação do Carregado, a escassos 36 quilómetros de distância. Inicialmente construídas em bitola de 1,44 metros, as vias portuguesas mudam, em 1861, para a bitola de 1,67 metros a fim de se ajustarem à rede espanhola [4].

Ao norte de Portugal as locomotivas chegaram ligeiramente mais tarde. Só em 1875 é que foram inauguradas as linhas do Minho e do Douro. Também nesse ano foi inaugurado a linha do Porto à Póvoa. Em 1877 é finalizada a ponte Maria Pia sobre o Douro, construída pela casa Eiffel, lançada entre o Porto e Vila Nova de Gaia, estabelece finalmente a ligação física entre Lisboa e Porto por caminho de ferro. Esta obra de arte é, sem dúvida, a mais emblemática obra de engenharia ferroviária construída em Portugal.

Em paralelo novas linhas são projetadas e construídas. A norte duas ligações internacionais foram estabelecidas, em 1886 o Porto liga-se à Galiza através de Valença, na linha do Minho, e a linha do Douro, fruto da vontade dos burgueses do Porto, liga-se a Salamanca em 1887. Até 1949, com a chegada da locomotiva a Arco de Baúlhe, terminos da linha do Tâmega, o caminho de ferro português, com altos e baixos, e algumas dificuldades financeiras expande-se [4].

A Figura 2.2 apresenta o mapa dos caminhos de ferro de Portugal em 1895 e faz ainda referência a algumas colónias ultramarinas, atualmente países africanos independentes, incluindo Angola e Moçambique que ainda hoje é possível verificar-se a existência destas linhas em funcionamento.

sessenta do século passado, reunindo consideráveis e incomuns meios financeiros, executa-se a renovação integral da via (RIV), privilegiando já, tal como nos nossos dias, o eixo Braga – Lisboa. Em 1975 a CP, que já era detentora da concessão única, é nacionalizada pelo governo revolucionário [4].

A partir da década de oitenta, duas tendências opostas e contraditórias tornam-se até aos dias de hoje. Por um lado, encerram-se vias, principalmente em Trás-os-Montes, no Alentejo e noutras regiões interiores. Viseu, uma importante capital de distrito que conseguiu um desenvolvimento notável nas últimas décadas, viu ser-lhe retirado o serviço ferroviário em 1988; por outro lado modernizam-se as redes que servem as áreas metropolitanas de Lisboa e Porto, onde novo e moderno material circulante é introduzido [4].

Em 1988, o Conselho de Ministros, presidido pelo Primeiro Ministro Aníbal Cavaco Silva, aprova o plano de modernização dos caminhos de Ferro 1988-94. Na sequência deste plano, que apostava exclusivamente nos sistemas ferroviários das áreas metropolitanas de Lisboa e Porto e também nos principais eixos de longo curso, sobretudo Braga – Faro, cerca de 770 km de via-férrea foram definitivamente encerrados. A norte, esta política de encerramento de linhas foi particularmente devastadora [4].

No entanto, nas últimas duas décadas, podemos extrair um conjunto de mudanças assaz positivas para o transporte ferroviário em Portugal. Logo como prioridade ressalta a modernização e otimização conseguidas nos já referidos sistemas ferroviários das metrópoles de Lisboa e Porto [4].

Foram renovadas vias, alguns eixos quadruplicados, e novos comboios foram comprados. Em 1991 foi inaugurada a Ponte de S. João sobre o Douro e finalmente, em 29 de julho de 1999 o comboio vence o Tejo atravessando-o em Lisboa sobre a ponte 25 de Abril. A renovação integral das Linhas da Beira Baixa, do Minho até Braga, do Douro até Caíde e da Linha do Sul em direção ao Algarve, assim como a introdução de novas tecnologias de controlo e comando de circulação, de comunicações e de segurança e apoio à condução também devem ser contabilizadas como evoluções deveras positivas. Os comboios Alfa Pendular que hoje circulam já de Braga a Faro, apesar de tudo, introduziram um novo paradigma de qualidade no serviço ferroviário português [4].

A Figura 2.3, representa a linha de circulação das locomotivas bem como os Comboios CP e Alfa Pendular.



Figura 2. 3 – Comboios CP e Alfa Pendular [5].

2.2.1. Constituição do Metropolitano de Lisboa

A sociedade Metropolitana de Lisboa, é constituída a 26 de janeiro de 1948 e tinha como objetivo o estudo técnico e económico, em regime exclusivo, de um sistema de transportes coletivos fundado no aproveitamento do subsolo da cidade. A concessão para a instalação exploração do respetivo serviço público veio a ser outorgada em 1 de julho de 1949 [6].

Os trabalhos de construção iniciaram-se em 7 de agosto de 1955 e, quatro anos depois, em 29 de dezembro de 1959, o novo sistema de transporte foi inaugurado. A rede aberta ao público consistia numa linha Y constituída por dois troços distintos, Sete Rios (atualmente, Jardim Zoológico) – Rotunda (atualmente, Marquês Pombal) e Entre Campos – Rotunda (Marquês Pombal), confluindo num troço comum, Rotunda (Marquês Pombal) – Restauradores [6].

A Figura 2.4, ilustra o momento da inauguração do Metropolitano de Lisboa bem como as locomotivas ML usadas durante à sua inauguração.



Figura 2. 4 – Terminal e oficina do Metro Sete-rios, 1957 – 1977 [6].

O Metropolitano de Lisboa veio a tornar-se um fator determinante no desenvolvimento da cidade, traçando linhas de expansão urbanísticas e funcionando como motor principal do sistema de transportes da cidade, dada a sua segurança, rapidez e regularidade [6].

O primeiro escalão de construção da rede foi concretizado em fases sucessivas. Assim, em 1963 entra em exploração o troço Restauradores / Rossio, em 1966, o troço Rossio / Anjos e, por último, é completado em 1972 com a ligação Anjos / Alvalade. Por razões conjunturais houve, a partir de 1972, uma interrupção nos projetos de expansão inicialmente previstos para a rede. Este interregno só viria a terminar em 1988. Em 1975 o metropolitano é nacionalizado. Em 1978, passa a Empresa Pública, sendo publicado novos estatutos, e a empresa passa a denominar-se Metropolitano de Lisboa E.P [6].

A Figura 2.5, ilustra o interior das primeiras locomotivas da marca ML 7 usadas pelo Metropolitano de Lisboa bem como à constituição do seu interior.



Figura 2. 5 – Carruagem Sorefame ML 7 e seu interior [6].

Em 1988, dezasseis anos depois da última inauguração são abertas ao público duas novas extensões, Sete Rios (Jardim Zoológico) – Colégio Militar / Luz e Entre Campos –

Cidade Universitária. A primeira compreendendo as estações Laranjeiras, alto dos Moinhos e Colégio Militar / Luz e a segunda a estação Cidade Universitária. Em 1993, entram em exploração duas novas extensões, Cidade Universitária – Campo Grande e Alvalade – Campo Grande. A estação Campo Grande, que se encontra inserida no complexo dos viadutos do Campo Grande, constitui a primeira estação elevada da rede e a segunda estação de correspondência do Metropolitano de Lisboa. Nesta data é também inaugurada a primeira fase do segundo Parque de Material e Oficinas (PMO II), em Calvanas, o acesso a estas instalações é feito em viaduto a partir do nó ferroviário adjacente à estação do Campo Grande [6].

Em 1995 é concretizada a desconexão do nó da Rotunda (Marquês de Pombal), obra fundamental no âmbito da reestruturação e expansão da rede. São assim criadas duas linhas distintas e dado o primeiro passo para o estabelecimento de uma rede [9].

Em 1997 abrem ao público as extensões Colégio Militar – Pontinha, na Linha Azul, Rotunda (Marquês de Pombal) – Rato, na linha Amarela. Passam a existir duas linhas independentes com correspondência nas estações Rotunda (Marquês de Pombal) e Campo Grande. Em finais de 1997 é interrompido o serviço de exploração entre Restauradores e Rossio para permitir a ligação Rossio – Baixa / Chiado e Restauradores – Baixa / Chiado. Devido ao incêndio ocorrido a 19 de outubro de 1997 na estação Alameda, só em março de 1998 é reposto o serviço entre Areeiro e Martim Moniz (antiga estação Socorro) constituindo esta data o início da exploração com três linhas independentes, Linha Azul, Pontinha – Restauradores, Linha Amarela, Campo Grande – Rato e Linha Verde, Campo Grande – Martim Moniz (Socorro) [6].

Em abril de 1998 abre à exploração o troço Rossio – Baixa / Chiado – Cais do Sodré. A estação Baixa / Chiado é uma estação dupla, tendo nesta data aberto à exploração apenas a estação respeitante à linha Verde. A outra parte, pertencente à linha Azul, tem a sua abertura à exploração prevista para agosto de 1998, permitindo então a correspondência entre as linhas Azul e Verde [9].

Em maio de 1998 abre à exploração a Linha – Vermelha, Linha do Oriente. Trata-se de um marco particularmente importante na história do Metropolitano de Lisboa pois é a primeira linha completamente independente que é inaugurada desde a entrada exploração da rede em 1959. Para além da remodelação da estação Alameda que passa a ser uma estação dupla permitindo a correspondência entre as linhas Verde e Vermelha, esta linha

inclui seis novas estações, a saber: Olaias, Bela Vista, Chelas, Olivais, Cabo Ruivo e Oriente. Não abriram ao público, nesta data, as estações Cabo Ruivo e Olivais.

Com a abertura da Linha Vermelha entre Alameda e Oriente, dos prolongamentos da Linha Verde do Rossio ao Cais do Sodré e da linha Azul dos Restauradores à Baixa / Chiado, o Metropolitano de Lisboa passou a funcionar com quatro linhas independentes e interligadas, realizando as conexões essenciais com a rede ferroviária (suburbana e regional) [6].

A Figura 2.6, faz referência à estação dos Restauradores bem como o momento da chegada do comboio a mesma.



Figura 2. 6 – Estação do Restauradores [6].

Em julho de 1998 abre à exploração a estação Cabo Ruivo. A abertura da estação Olivais virá a ter lugar no início de novembro. Em agosto de 1998 abre à exploração a ligação de Restauradores – Baixa / Chiado criando assim a correspondência entre as linhas Azul e Verde. Em novembro de 1998 abre à exploração a estação de Olivais. Em fevereiro de 1999 entra em serviço de exploração a nova geração de material circulante ML 97. Na mesma data entram em funcionamento industrial as instalações do novo Parque de Material e oficinas (PMO III), na Pontinha [6].

A Figura 2.7, ilustra a rede atual do Metropolitano de Lisboa, onde é possível serem observadas e identificadas todas as estações que a constituem.



Figura 2. 7 – Diagrama atual da rede do Metropolitano de Lisboa [6].

2.3. Origem do Sistema Ferroviário em Angola

O projeto inicial para construção do caminho de ferro em Angola teve seu início com a construção do Caminho de Ferro de Luanda (CFL), cujo seu primeiro esboço é de Pompílio Pompeu de Carpo, que em 1848 decidiu ligar Luanda a Calumbo por locomotiva, um meio de transporte revolucionário e que na época dava os primeiros passos. O autor, natural da ilha da Madeira em 1848, apresentou o projeto do caminho de ferro aos comerciantes de “Loanda” e incluiu Herr Shut que era o cônsul honorário de Portugal em Hamburgo e facilitava a aquisição das locomotivas “Henchel” e as carruagens, as famosas locomotivas inglesas ficavam por conta do autor do projeto, quem fizesse melhores condições de preços, fornecia o material circulante. Pompílio de Carpo era mais dado ao teatro e ao jornalismo, e acabou deixando o projeto do caminho de ferro entre Luanda e Calumbo para segundo plano. Os sócios também se desinteressaram, porque os custos das locomotivas e vagões eram elevadíssimos [7].

O governador geral José Baptista Andrade retoma o projeto em 1862, mas em nada adiantou porque não conseguiu atrair capitais privados nem através dos cofres públicos. Em 5 de Agosto de 1873, o então Ministro do ultramar e da marinha, Andrade Corvo,

ordenou ao governador geral de Angola que iniciasse de imediato a execução de projetos que dotassem Angola de “viação pública”. Mas em Luanda nada aconteceu. O ministro insiste em 5 de fevereiro de 1874. O governador ignorou as ordens. Pressionado por Lisboa, em dezembro assina um decreto que aprova o contrato para construção do caminho de ferro entre o Governo geral de Angola e um consórcio formado por poderosos comerciantes e indústrias de Luanda. Em 1877 o ministro Andrade Corvo vai à Luanda acompanhado de uma equipa de engenheiros liderada pelo major Manuel Rafael Gorjão. Os técnicos perderam muito tempo a discutir o traçado da linha. Uns defendiam que a mesma tinha de contemplar os transportes fluviais através do rio Kwanza, outros queriam que a linha fosse autónoma, face as divergências, a construção efetiva da linha apenas começou em 31 de outubro de 1886. O diretor das obras era João Burnay, um experiente engenheiro em ferrovias. Era tão competente que em 31 de 1888 foi inaugurado o percurso de 45 quilómetros entre Luanda e Funda. O governador decretou feriado e o comércio de Luanda fechou para todos irem à estação da cidade alta ver partir o comboio, puxado por uma moderna máquina (na altura) Armstrong. Em seguida, arrancou a construção do caminho de ferro de Malanje e ao mesmo tempo o ramal do Golungo Alto. No Dombe Grande começa a ser construída à linha de 17 quilómetros para o posto do Cuio. No Sul arrancam as obras do caminho de ferro de Moçâmedes em direção ao Lubango, vencendo a serra da Chela, considerada intransponível. Mas para as famosas máquinas alemãs Henschel e Koppel não havia impossíveis. Do Lobito ao Cubal o inglês Robert Williams descobre as minas de cobre do Katanga e percebeu que só poderia retirar o minério pelo porto do Lobito. Propôs ao governo português a construção de um caminho de ferro até à fronteira com o então estado independente do Congo Belga. Em 1902 é assinado o contrato de concessão por 99 anos. Em março de 1903 começam os trabalhos na linha, a partir do Lobito, a construção do caminho de ferro de Benguela (CFB), operários europeus, desde portugueses, gregos, italianos juntamente com operários angolanos trabalhavam incansavelmente no assentamento dos carris. Em 1908, aconteceu o momento tão esperado que foi a inauguração dos primeiros 197 quilómetros entre Lobito e Cubal. Os trabalhos continuaram de tal forma que 1911 a linha foi estendida e estavam construídos 360 quilómetros onde em 1912 as locomotivas chegavam ao Huambo [7].

A Figura 2.8, ilustra o Caminho de Ferro de Luanda bem como os Comboios usados atualmente onde se verifica também o momento de embarque na estação final do Porto de Luanda.



Figura 2. 8– Caminhos de ferro de Angola e suas locomotivas [7].

A Figura 2.9, faz referência da atual rede ferroviária de Angola que nos últimos anos tem vindo a ser elaborado estudos de formas a ampliar à sua extensão no território nacional.



Figura 2. 9 Rede ferroviária Angolana [8].

Atualmente Angola conta com três principais troços ferroviários localizados em Luanda, Benguela e Namibe. Luanda conta com uma extensão de 479 quilómetros,

Benguela com uma extensão de 1336 quilómetros atravessando Angola do centro até a costa leste e Namibe (Moçâmedes) com 907 quilómetros que liga a costa atlântica do Sul e Menongue (Cuando-Cubango) [8].

As locomotivas em Angola atualmente funcionam todas a diesel, sendo nos últimos anos ter-se vindo a realizar estudos para a construção linhas e implementação de metros de superfície para a província de Luanda de formas a melhorar a mobilidade da capital do país.

2.4. Sistema de Alimentação de Tração em Corrente Alternada

Para que o sistema de alimentação da subestação de tração funcione é necessário à sua alimentação elétrica através de uma rede de distribuição elétrica ou até mesmo por fontes de produção independente. Sendo a transformação feita de AT/MT e, por conseguinte, a alimentação da catenária tal como pode ser observado na Figura 2.10 e a classificação da eletrificação do sistema ferroviário na europa na Figura 2.11.

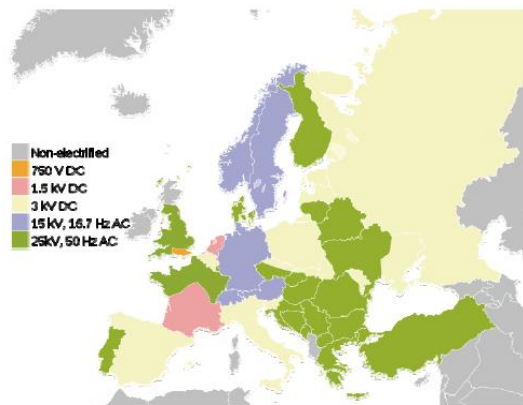
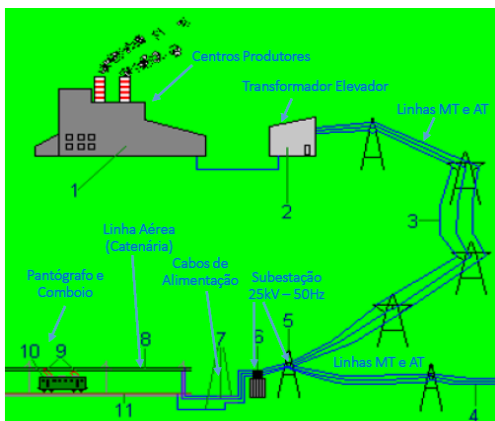


Figura 2. 10 – Exemplo do sistema de alimentação elétrica para uma SST [9]. Figura 2. 11– Classificação dos níveis de tensão usados na eletrificação ferroviária na Europa [9].

O sistema de alimentação em corrente alternada é utilizado nos transportes ferroviários para longo curso a uma tensão de 25 kV e frequência de 50 Hz. A distância entre subestações é de aproximadamente 40 km a 70 km, reduzindo assim os pontos de injeção. O sistema de alimentação em AC geralmente é feito por alimentação aérea onde o pantógrafo é alimentado pela catenária tal como pode ser observado na Figura 2.12 [9].



Figura 2. 12 - Representação da catenária e o pantógrafo [10].

A catenária é um sistema de distribuição e alimentação elétrica aérea para as unidades motoras e transformadores das locomotivas cuja captação direta da energia é feita por meio de um pantógrafo.

O pantógrafo é o dispositivo montado no topo da locomotiva, que o alimenta com corrente alternada captada diretamente da catenária. Geralmente existem dois pantógrafos por locomotivas, e o que é acionado é aquele que se encontra atrás, ou seja, no sentido inverso da marcha da locomotiva [11].

Os pontos de injeção das subestações de tração são separados por zonas neutras onde a catenária não é energizada neste que é a zona de separação das subestações.

2.4.1. Sistema de Alimentação Monofásico 1X25 kV

O sistema de alimentação monofásico 1x25 kV é alimentado por subestações diferentes e separadas por zonas neutras sendo alimentado a catenária e um dos terminais ligado à terra e ao sistema de retorno. A Figura 2.13 ilustra a representação de um sistema de alimentação monofásico.

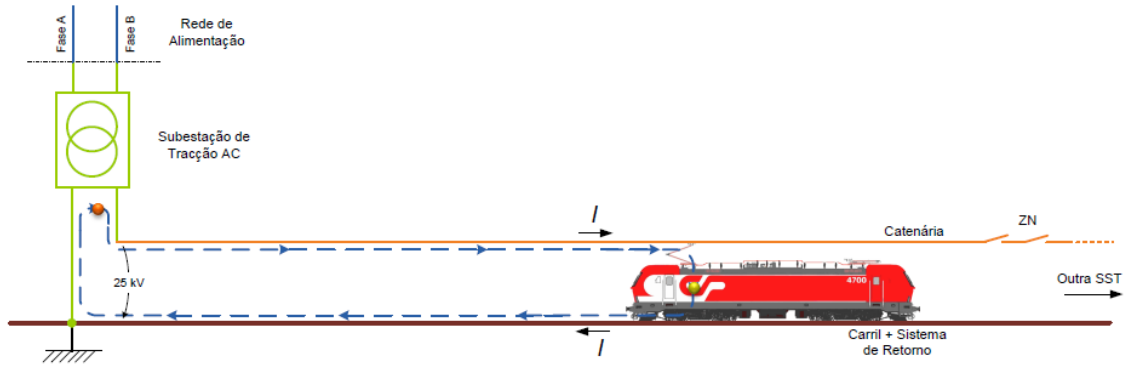


Figura 2. 13 - Representação do sistema monofásico [12].

2.4.2. Sistema de Alimentação Bifásica 1X25 kV

Nas subestações de tração com ligação bifásica existem normalmente dois transformadores de potência alimentados pelas mesmas duas fases, funcionando um em carga e outro em reserva. Neste caso não é obrigatório existir uma zona neutra junto à subestação para separação de fases. No entanto poderá existir uma zona neutra para facilitar a exploração da rede, ou permitir a utilização de dois transformadores de potência em simultâneo, quando os encravamentos o permitirem. Usualmente as subestações de tração bifásica recebem linhas de alimentação com duas fases [12].

A Figura 2.14, representa de uma forma simplificada a configuração de alimentação bifásica de uma subestação de tração onde é possível observar-se os transformadores de potência, catenária e o circuito de retorno.

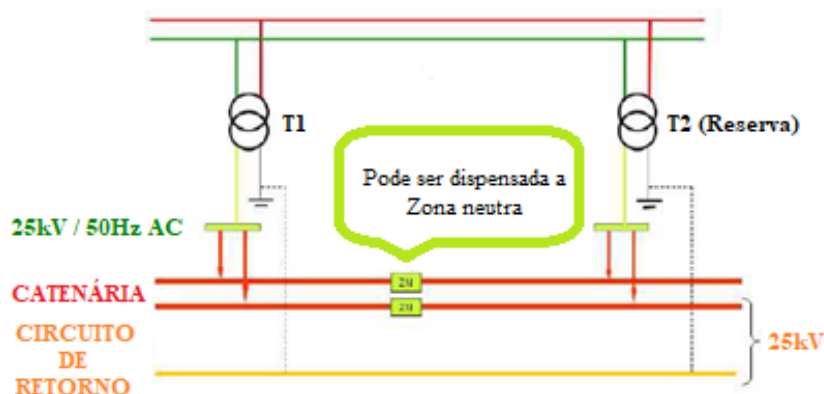


Figura 2. 14 - Representação da configuração para alimentação bifásica [13].

2.4.3. Sistema de Alimentação Trifásica 1X25 kV – Ligação em V

As subestações com ligação em “V” possuem três transformadores de potência, em que dois funcionam em ligação “V” e o terceiro como reserva que pode substituir qualquer dos outros dois. Na ligação em “V” cada transformador é alimentado por duas fases, sendo um comum aos dois transformadores, daí a designação em “V”. Cada transformador alimenta um setor de catenária e pode funcionar independentemente de o outro estar ou não ao serviço. É obrigatório a existência de uma zona neutra entre cada setor. Com esta ligação procura-se provocar um menor desequilíbrio na rede primária comparativamente ao provocado na ligação bifásica. O desfasamento entre tensões secundárias é de 60° , equivalente a uma diferença de potencial de 25 kV entre elas. As subestações de tração com ligação “V” recebem obrigatoriamente linha(s) de alimentação com três fases (trifásicas) [14].

A Figura 2.15, representa de uma forma simplificada a configuração de alimentação em V de uma subestação de tração onde é possível observar-se os transformadores, catenária, zona neutra, circuito de retorno e a alimentação do Comboio pela catenária.

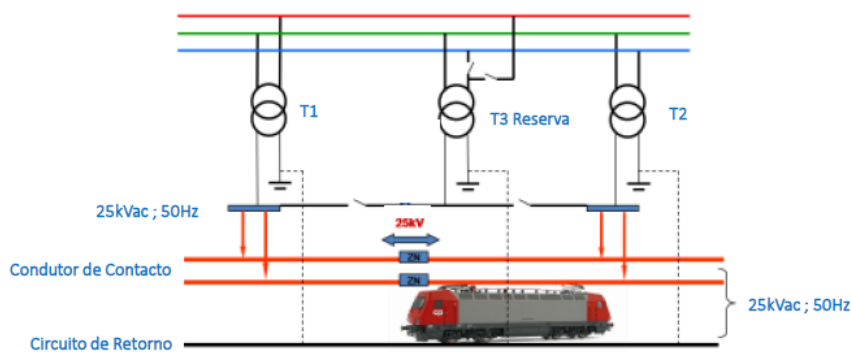


Figura 2. 15 - Representação ligação em V [15].

2.4.4. Sistema de Alimentação Elétrica 2X25 kV

Nas subestações de tração com o sistema 2x25 kV o transporte de energia é feito a 50 kV, sendo o circuito de retorno a diferença de potencial de 25 kV. Este sistema utiliza autotransformadores ao longo da linha cuja função é transferir energia do *feeder* negativo

para a catenária onde a interligação é feita pela catenária (+25 kV), *feeder* negativo (-25 kV) e o circuito de retorno/terra [16].

As Figuras 2.16, ilustra o diagrama do autotransformador de tração, bem como é indicado o sentido das correntes e a tensão na catenária e no *feeder*. A Figura 2.17 representa o autotransformador numa subestação de tração.

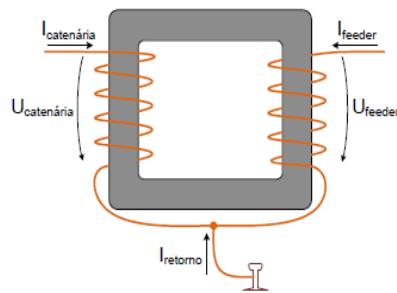


Figura 2. 16 - Diagrama do autotransformador de tração [16]. Figura 2. 17 - Autotransformador de tração [17].

Apenas existe corrente no sistema de retorno, à passagem de um comboio na zona delimitada bem como existe menores intensidade de corrente a passar pelo circuito de retorno bem como pela catenária devido ao *feeder* negativo e o efeito dos autotransformadores ao longo da linha. A Figura 2.18 representa o esquema simplificado do sistema de alimentação 2x25 kV.

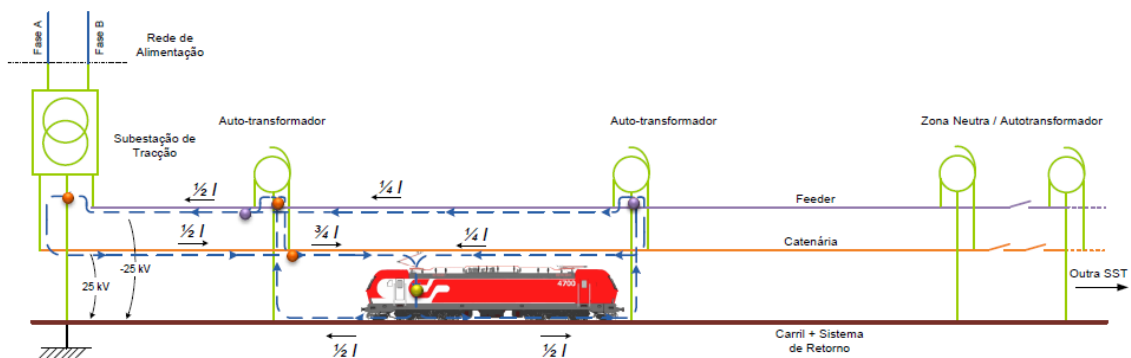


Figura 2. 18 - Representação do sistema de alimentação 2x25kV [18].

2.5. Sistema de Alimentação Elétrica de Tração em Corrente Contínua

Os transportes ferroviários urbanos ou suburbanos em DC, tipicamente são alimentados com os níveis de tensão de 600, 750 e 1500 V. As SST em DC são alimentadas a partir da rede quer pública ou privada e dispõem de grupos de transformação (trifásica) e retificação não controlada para converter a tensão de alimentação em AC para DC. Os retificadores não controlados de díodos são os comumente utilizados apresentando uma solução mais económica e permite apenas o fluxo de corrente no sentido da rede para a carga [18].

Em alternativa existem soluções com retificadores controlados com utilização de dispositivos semicondutores de comutação forçada (IGBT, GTO, etc). Contudo são soluções tecnicamente mais complexas e mais onerosas. São geralmente utilizados em variadores de velocidade com fator de potência praticamente unitário e para transmissão de energia em DC em alta tensão.

Na Figura 2.19, está representado o sistema de retificação AC – DC onde é possível observar-se a ilustração da rede de alimentação (AC), transformador trifásico e o retificador trifásico.

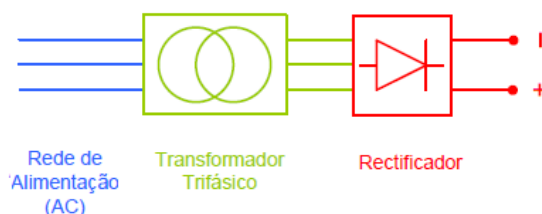


Figura 2. 19 – Sistema de retificação AC – DC [18].

Nas subestações de tração DC não existem zonas neutras a separar as catenárias alimentadas por subestações diferentes e a secção dos condutores da catenária é normalmente maior. Na Figura 2.21 é ilustrado a distância habitual entre subestações.

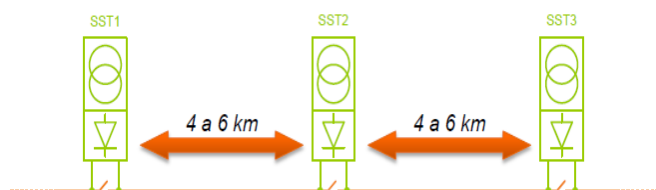


Figura 2. 20 – Valores habituais para a distância entre SST do tipo DC [18].

As SST em DC são projetadas em paralelo, sendo que a corrente pode fluir de mais do que uma subestação tal como ilustrado na Figura 2.21.

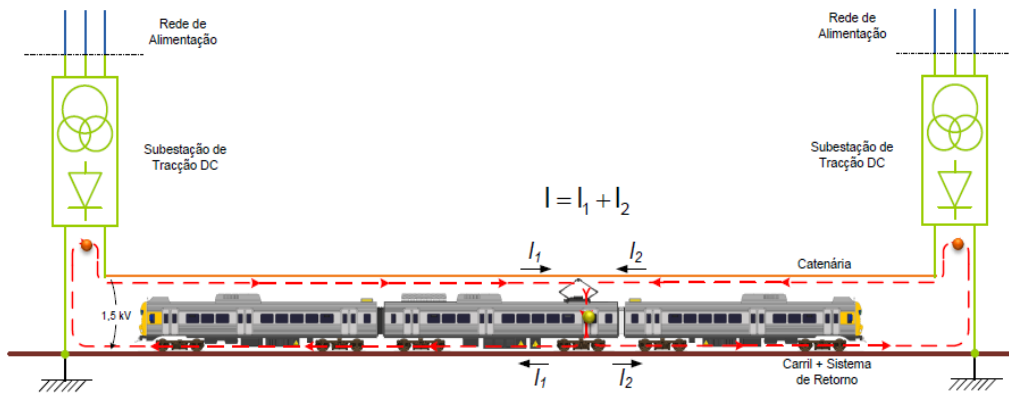


Figura 2. 21 – Distância e sentidos da corrente entre SST DC [18].

As subestações de tração com alimentação do 3º carril têm uma distância entre elas de aproximadamente 2,5 km sendo que seu sistema de alimentação comporta os seguintes equipamentos: Transformador de MT/BT – Y/YD, retificador dodecafásico a diodos, cabos de alimentação do 3º carril e pantógrafo.

A Figura 2.22 ilustra o sistema de tração para funcionamento em regime dinâmico e permanente da locomotiva. É possível observar a alimentação da locomotiva pelo 3º carril bem como o carril de retorno, barramento DC, ondulator trifásico de tensão que tem como função converter o sinal de tensão CC para o sinal AC de forma a permitir alimentar as máquinas AC.

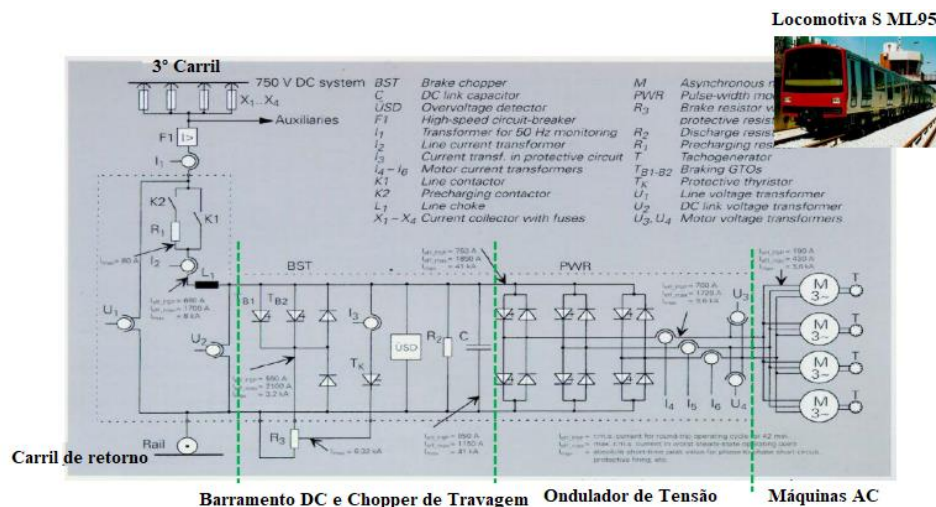


Figura 2. 22 - Sistema de alimentação do 3º carril [19].

Capítulo 3

Impacto do Conteúdo Harmónico da Corrente Elétrica no Sistema Elétrico

O presente capítulo descreve as consequências do conteúdo harmónico das correntes no sistema elétrico, suas classificações e os seus efeitos.

3. IMPACTO DO CONTEÚDO HARMÓNICO DA CORRENTE ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO

3.1. Impacto do Conteúdo Harmónico da Corrente na Rede Elétrica

Durante várias décadas a grande maioria das cargas ligadas as redes de energia elétrica eram cargas lineares. Como as tensões de alimentação são sinusoidais, as correntes consumidas eram também sinusoidais e com a mesma frequência, podendo eventualmente estar desfasada relativamente à tensão dependendo do carácter indutivo ou capacitivo. A utilização de conversores eletrónicos de potência tem crescido nos últimos anos, como consequência existe uma crescente degradação das formas de onda de corrente e tensão dos sistemas de alimentação. Quase todos os equipamentos eletrónicos com alimentação monofásica ou trifásica incorporam um circuito retificador não controlado à sua entrada, seguido de um conversor comutado do tipo CC-CC ou CC-CA. A corrente da rede elétrica com série de Fourier, apresentando termos sinusoidais não nulos de frequência múltipla inteira da frequência fundamental é denominada componente harmónica. A distorção harmónica dá-se quando existem cargas não lineares ligadas a rede elétrica, o elevado conteúdo harmónico da corrente distorce a tensão e as quedas de tensão provocadas pelos harmónicos nas impedâncias das linhas faz com que tensões de alimentação fiquem distorcidas. A presença de harmónicas na rede elétrica contribui para o aumento das perdas relacionadas com o transporte e distribuição de energia elétrica, problemas de interferências com o sistema de comunicação e na degradação do funcionamento da maior parte dos equipamentos ligados a rede. A Fig.4.1 ilustra como exemplo o sinal da corrente distorcido, a componente fundamental e sua respetiva terceira harmónica [20].

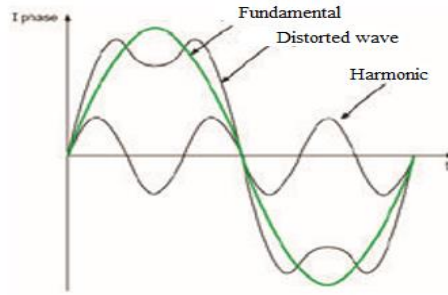


Figura 3. 1 - Evolução temporal da corrente distorcida, componente fundamental e sua terceira harmônica [20].

3.2. Classificação e Quantificação da Distorção Harmônica

A caracterização da distorção harmônica da corrente ou tensão num sistema elétrico é feita de acordo com a sua ordem, frequência e sequência tal como pode ser observado na Tabela 3.1.

Tabela 3. 1 - Classificação das harmônicas [21].

Ordem	$h=1$	$h=2$	$h=3$	$h=4$	$h=5$	$h=6$	$h=7$	$h=8$	$h=9$	$h=10$	$h=11$	$h=12$	$h=13$...	$h=h_{max}$
Freq. (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	...	$h \times 50$
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

A ordem h de uma harmônica está relacionada com o múltiplo da frequência fundamental. Para a harmônica de ordem 3, tem uma frequência (150 Hz) três vezes superior à frequência fundamental. A sequência está relacionada com o sentido de rotação do campo girante, criado pela respetiva harmônica [21].

A ordem das harmônicas é designada de sequência direta (3.1), inversa (3.2) e homopolar (3.3).

Generalizando e considerando $k = 0,1,2,3, \dots$, obtém-se a ordem das harmônicas h de sequência direta (3.1), inversa (3.2) e homopolar (3.3).

$$h = 3k + 1 \tag{3.1}$$

$$h = 3k + 2 \tag{3.2}$$

$$h = 3k + 3 \quad (3.3)$$

Generalizando, a ordem das harmónicas h geradas pelos retificadores (que podem ser monofásicos em ponte ou trifásicos em ponte) pode ser expressa com a seguinte equação (3.4).

$$h = k \times q \pm 1, k = 1,2,3, \dots \quad (3.4)$$

Sendo q o índice de pulsação da tensão de saída do retificador [21].

As amplitudes ou os valores eficazes das correntes harmónicas absorvidas pelo retificador (que podem ser monofásicos ou trifásicos) dependem apenas da ordem respetiva h e da amplitude ou valor eficaz da componente fundamental. Assim, como exemplo para o retificador monofásico em ponte não controlado com carga RL, o valor eficaz para a harmónica de ordem h é expressa pela equação (3.5).

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (3.5)$$

Com I_1 a representar o valor eficaz da componente fundamental da corrente.

As harmónicas de ordem ímpar são muito mais significativas que as harmónicas de ordem par. As harmónicas de ordem par devem-se geralmente à assimetria da corrente, na presença de uma componente contínua [21].

Habitualmente e para a grande maioria das cargas não lineares predominam as harmónicas de ordem ímpar.

Através do desenvolvimento matemático em séries de Fourier, é possível decompor a corrente ou tensão num somatório de correntes ou tensões sinusoidais com frequências múltiplas da fundamental de acordo com a equação generalizada (3.6) [21].

A série de Fourier representa uma forma efetiva de estudar, analisar e quantificar matematicamente a distorção harmónica e permite inspecionar os vários constituintes da forma de onda distorcida através da sua decomposição [22].

$$s(t) = \sum_{h=1}^{\infty} a_h \sin(h\omega t + \varphi_h) + \sum_{h=1}^{\infty} b_h \cos(h\omega t + \varphi_h) \quad (3.6)$$

Em que:

$s(t)$ – É a função periódica da frequência angular;

h – Número inteiro correspondente à ordem da harmónica, onde $h = 1$ corresponde à frequência fundamental;

ω – Frequência angular em rad/s;

φ_h – Ângulo de fase da ordem da harmónica h correspondente;

a_h, b_h – Coeficientes de Fourier.

Os coeficientes de Fourier a_h e b_h são obtidos através das equações (3.7) e (3.8).

$$a_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} s(t) \sin(h\omega t) d(\omega t) \quad (3.7)$$

$$b_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} s(t) \cos(h\omega t) d(\omega t) \quad (3.8)$$

Como exemplo, a Figura 3.2 faz referência à evolução temporal em regime permanente da forma de onda da corrente de entrada na fase do retificador trifásico em ponte não controlado com carga RL. Na saída do retificador admite-se a corrente i_d quase constante e de valor médio I_d .

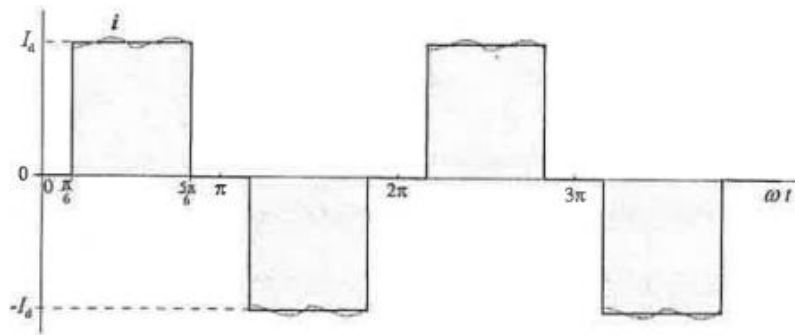


Figura 3. 2 – Forma da corrente em regime permanente de entrada na fase do retificador trifásico em ponte com carga RL [23].

3.3. Avaliação da Distorção Harmónica da Corrente no Sistema Elétrico

Generalizando, a corrente elétrica periódica distorcida expandida na Série de Fourier é expressa pela equação (3.9) [19]. E depende do valor eficaz de cada harmónica de corrente I_h e angulo de fase φ_h .

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \varphi_h) \quad (3.9)$$

Considerando a existência de harmónicas de ordem ímpar, exceto as terceiras harmónicas e as suas múltiplas e a corrente na carga i_d praticamente constante e de valor médio I_d , a corrente na entrada para as três fases referente à entrada do retificador trifásico em ponte tal como pode ser verificado na Figura 3.3 é expressa pelas equações (3.10), (3.11), (3.12) [24].

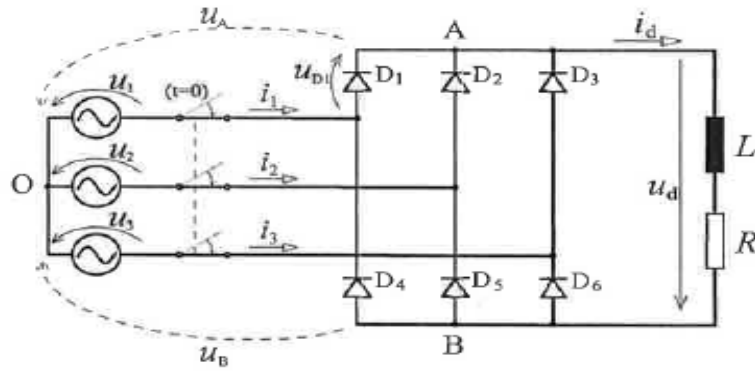


Figura 3. 3 – Esquema de princípio do retificador trifásico em ponte não controlado com carga RL [23].

$$i_1 = \frac{4I_d}{\pi} \sum_{\substack{h=1 \\ h_{\text{impar}} \\ h \neq 3n}}^{\infty} \frac{1}{h} \sin\left(\frac{h\pi}{3}\right) \sin(h\omega t) \quad \text{com } n = 3, 9, \dots \quad (3.10)$$

$$i_2 = \frac{4I_d}{\pi} \sum_{\substack{h=1 \\ h_{\text{impar}} \\ h \neq 3n}}^{\infty} \frac{1}{h} \sin\left(\frac{h\pi}{3}\right) \sin\left(h\omega t - h\frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{com } n = 3, 9, \dots \quad (3.11)$$

$$i_3 = \frac{4I_d}{\pi} \sum_{\substack{h=1 \\ h_{\text{impar}} \\ h \neq 3n}}^{\infty} \frac{1}{h} \sin\left(\frac{h\pi}{3}\right) \sin\left(h\omega t - h\frac{4\pi}{3}\right) \quad \text{com } n = 3, 9, \dots \quad (3.12)$$

A corrente elétrica à entrada do retificador apresenta o espectro de amplitudes harmónicas ímpares e não múltiplas de 3 tal como pode ser comprovado na Figura 3.4.

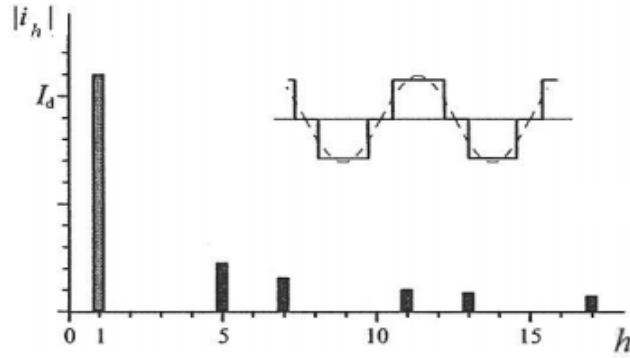


Figura 3. 4 – Espectro de amplitudes das harmónicas a entrada do retificador [23].

A THD_i está associada à corrente de carga e representa a distorção harmónica total da corrente bem como a quantificação da corrente que é afetada pelas componentes harmónicas em um determinado ponto e é dada pela equação (3.13) .

$$THD_i = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (3.13)$$

Onde:

I_1 – Representa o valor eficaz da componente fundamental da corrente $h=1$

I_{RMS} – Representa o valor eficaz total da corrente

THD_i – Taxa de distorção harmónica da corrente

O cálculo do valor eficaz total da corrente é apresentado nas equações (3.14) e (3.15).

$$I_{RMS} = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (3.14)$$

$$I_{RMS} = I_1 \sqrt{1 + THD_i^2} \quad (3.15)$$

Onde o fator de distorção k_{dist} é obtido pela equação (3.16).

$$k_{dist} = \frac{I_1}{I_{RMS}} \quad (3.16)$$

Com o fator de distorção k_{dist} da equação (3.16) é possível ser obtido a taxa de distorção da corrente pela equação (3.17).

$$THD_i = \sqrt{\frac{1}{k_{dist}^2} - 1} \quad (3.17)$$

A taxa de distorção da demanda TDD_i é obtida de forma equivalente pelas equações (3.18) e (3.19).

$$TDD_i = \sqrt{\frac{THD_i^2}{1 + THD_i^2}} \quad (3.18)$$

$$TDD_i = \sqrt{1 - \left(\frac{I_1}{I_{RMS}}\right)^2} \quad (3.19)$$

Substituindo a equação (3.16) em (3.19) em alternativa a TDD_i é obtida com a equação (3.20).

$$TDD_i = \sqrt{1 - k_{dist}^2} \quad (3.20)$$

De acordo com a norma IEC 61000-3-2 [25] as harmônicas de corrente são classificadas de acordo com as seguintes condições e classes:

- Classe A: Equipamento trifásico equilibrado e outro tipo de equipamento que não se enquadram nas outras classes;
- Classe B: Equipamento portátil;

- Classe C: Equipamento de iluminação, incluindo dispositivos de controlo de iluminação;
- Classe D: Equipamentos com potência de entrada inferior a 600 W.

A norma IEEE 519-2014 estabelece limites de distorção da corrente elétrica e tensão para o sistema elétrico que incluem cargas lineares e não lineares.

A Tabela 3.2 apresenta os limites de distorção da corrente no sistema elétrico geral para valores eficazes de tensão entre 120 V e 120 kV. Estes valores são referidos a um ponto de ligação de fornecimento atribuído ao Distribuidor de Energia Elétrica. Na referida norma esse ponto é designado por Ponto Comum de Acoplamento (PCC – *Point of Common Coupling*). Estes limites dependem da relação entre a máxima corrente de curto-circuito I_{SC} e da amplitude da componente fundamental da corrente ($I_L = I_1, h=1$) no Ponto Comum de Acoplamento.

Tabela 3. 2 - Limites de distorção da corrente para sistemas de distribuição geral [26].

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics)^{a, b}						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20 ^c	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Não é objetivo principal nesta dissertação, abordar sobre as harmónicas de tensão. Contudo e pelo facto de existirem impedâncias a montante nos circuitos, as harmónicas de corrente dão origem a harmónicas de tensão. Por exemplo de acordo a norma NP EN 50160 os valores máximos de distorção harmónica de tensão (dependendo do nível de tensão BT, MT, AT e MAT) são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3. 3 - Valores máximos de distorção harmónica da tensão [27].

Valores máximos da distorção harmónica											
h	BT/MT	AT	MAT	h	BT/MT	AT	MAT	h	BT/MT	AT	MAT
	U < 45 kV	45 < U < 110 kV	U > 110 kV		U < 45 kV	45 < U < 110 kV	U > 110 kV		U < 45 kV	45 < U < 110 kV	U > 110 kV
2	2.0	1.6	1.5	15	0.5	0.3	0.3	28	-	0.2	0.2
3	5.0	3.0	2.0	16	0.5	0.2	0.2	29	-	0.6	0.6
4	1.0	1.0	1.0	17	2.0	1.3	1.0	30	-	0.2	0.2
5	6.0	4.5	3.0	18	0.5	0.2	0.2	31	-	0.6	0.6
6	0.5	0.5	0.5	19	1.5	1.1	1.0	32	-	0.2	0.2
7	5.0	3.0	2.0	20	0.5	0.2	0.2	33	-	0.2	0.2
8	0.5	0.4	0.4	21	0.5	0.2	0.2	34	-	0.2	0.2
9	1.5	1.1	1.0	22	0.5	0.2	0.2	35	-	0.6	0.6
10	0.5	0.4	0.4	23	1.5	1.0	0.7	36	-	0.2	0.2
11	3.5	2.5	1.5	24	0.5	0.2	0.2	37	-	0.5	0.5
12	0.5	0.2	0.2	25	1.5	1.0	0.7	38	-	0.2	0.2
13	3.0	2.0	1.5	26	-	0.2	0.2	39	-	0.2	0.2
14	0.5	0.2	0.2	27	-	0.2	0.2	40	-	0.2	0.2

3.4. Efeitos das Harmónicas

As harmónicas de tensão ou corrente são um dos principais causadores da degradação da qualidade de energia num sistema elétrico, sendo assim são mencionados alguns dos seus efeitos:

- Aumento das perdas por efeito de Joule dando origem a aquecimento nos equipamentos, vibrações nos enrolamentos e redução da vida útil dos transformadores;
- Ruído audível e redução da vida útil das máquinas elétricas rotativas;
- Disparo indevido dos semicondutores de potência em conversores de potência controlados e reguladores de tensão;
- Problemas na operação de relés de proteção, disjuntores e fusíveis;
- Aumento das perdas dos condutores elétricos por efeito de Joule;
- Aumento considerável na dissipação térmica dos condensadores, levando à deterioração do dielétrico;
- Redução da vida útil das lâmpadas e flutuação da intensidade luminosa;
- Interferência eletromagnética em equipamentos de comutação (conversores de potência);
- Mau funcionamento ou falhas de operação em equipamentos eletrónicos ligados à rede elétrica;

- Perdas por efeito Joule;
- Aquecimento e degradação do isolante;
- Perdas por efeito pelicular, resultando na diminuição da secção útil do condutor eléctrico;
- Necessidade de sobredimensionamento do condutor de neutro [28].

Capítulo 4

Modelo do Retificador Trifásico em Ponte não Controlado e do Transformador de Potência

O presente capítulo descreve o retificador trifásico em ponte não controlado e transformador de potência bem como os seus modelos implementados em simulação numérica.

4. MODELO DO RETIFICADOR TRIFÁSICO EM PONTE NÃO CONTROLADO E DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

4.1. Retificador Trifásico em Ponte não Controlado

As locomotivas são alimentadas por um sistema em corrente contínua e para a sua realização é necessário inicialmente a retificação do sinal em corrente alternada para contínua. Para a retificação do sinal em corrente alternada usamos os retificadores trifásicos em ponte não controlado o que a posterior é feita a inversão da corrente contínua para alternada de forma a alimentar os motores AC das locomotivas permitindo assim a sua circulação.

As retificações alimentadas a partir de rede trifásica de distribuição de energia são as mais utilizadas industrialmente, em virtude de produzirem tensões e correntes bastante mais lisas (com menor tremor) do que as variantes monofásicas ou bifásicas e ainda por existir interesse em aproveitar as três fases para distribuir grandes potências. Com alimentação monofásica não se obtêm índices de pulsação maiores do que $p = 2$ e, por isso, em potências elevadas tais retificações só se usam quando alguma razão obriga a ter apenas alimentação monofásica, como acontece, por exemplo, em viaturas de caminhos de ferro alimentadas por catenária. De entre as topologias de retificação para aplicações industriais a montagem trifásica em ponte é a mais utilizada. A Figura 4.1 ilustra o seu esquema de princípio com carga $R - L$ [29].

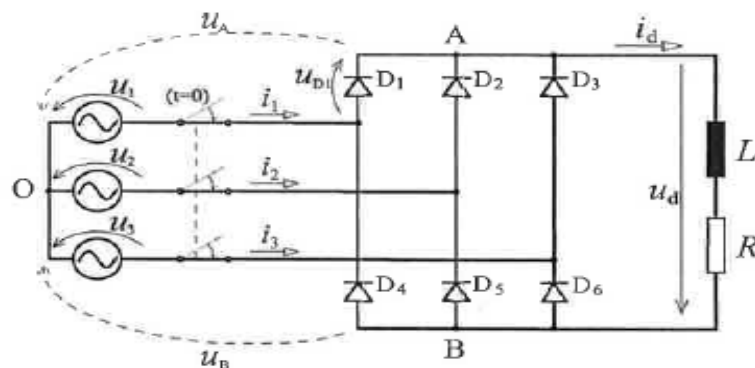


Figura 4. 1 - Retificador trifásico em ponte, não controlado com carga R-L [29].

O sistema trifásico de tensões simples sem conteúdo harmónico é definido pelas equações (4.1), (4.2) e (4.3). O valor eficaz das tensões é representado por U .

$$u_1 = \sqrt{2}U \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

$$u_2 = \sqrt{2}U \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.2)$$

$$u_3 = \sqrt{2}U \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (4.3)$$

Para o funcionamento do circuito da Figura 4.1 o grupo de díodos D_1, D_2, D_3 conduz sempre aquele que tiver maior potencial no ânodo, ao passo que no grupo de díodos D_4, D_5, D_6 conduz o que tiver menor potencial no cátodo. Este facto implica que o potencial no ponto A (tomando o ponto O como referência) acompanhe a envolvente superior das tensões simples, ao passo que o potencial no ponto B coincide com a envolvente inferior das tensões simples; isto porque se consideram interruptores ideais. É possível verificar em regime permanente os intervalos de condução dos díodos representados na Figura 3.2 [29].

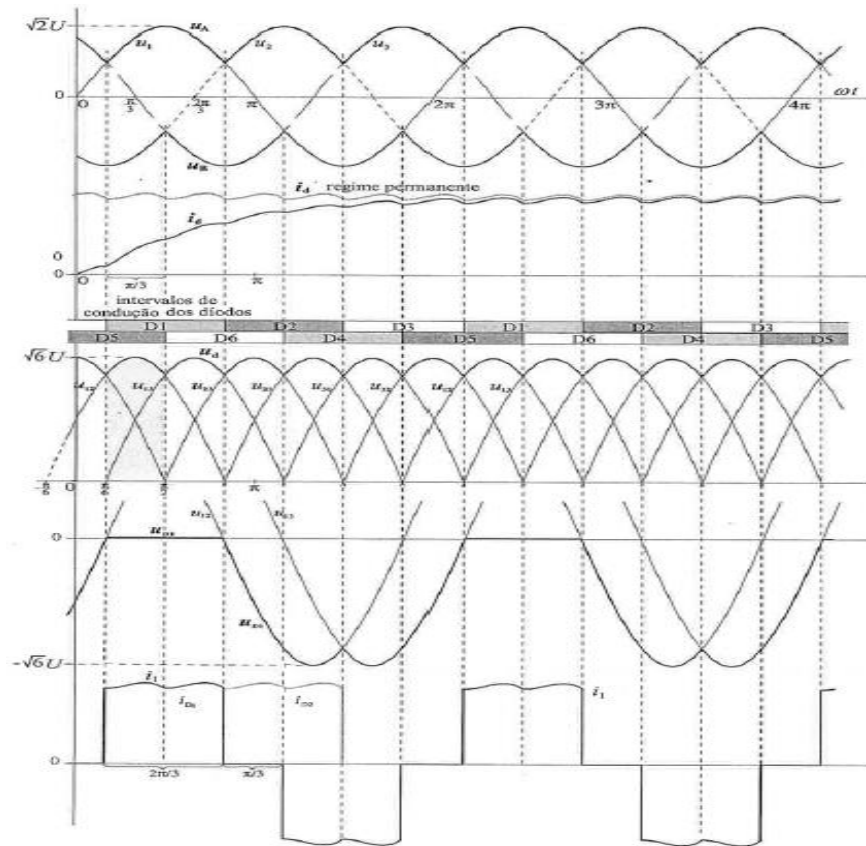


Figura 4. 2 - Diagrama de funcionamento do circuito de retificação trifásico em ponte não controlado carga R-L [29].

O valor médio U_d em regime permanente da tensão u_d na carga para um período $\pi/3$ é calculado pela equação 4.4.

$$U_d = \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} u_d dt = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/6}^{\pi/2} u_{12} d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} \sqrt{6}U \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6}U}{\pi} \left[-\cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\right]_{\omega t=\frac{\pi}{6}}^{\omega t=\frac{\pi}{2}} = \frac{3\sqrt{6}U}{\pi} \quad (4.4)$$

O valor médio I_d em regime permanente da corrente na carga R-L é obtido pela equação (4.5).

$$I_d = \frac{U_d}{R} \quad (4.5)$$

É importante referir que os fenómenos de comutação num retificador não controlado provocam deformações nas tensões alternadas que podem afetar outros consumidores

ligados a mesma entrada. Junto do retificador, durante cada comutação, as tensões nas fases envolvidas mantêm-se ambas iguais entre si com o andamento médio das tensões ideais em cada uma, o que se traduz numa evolução da tensão entre fases do tipo representado na Figura 4.3 [29].

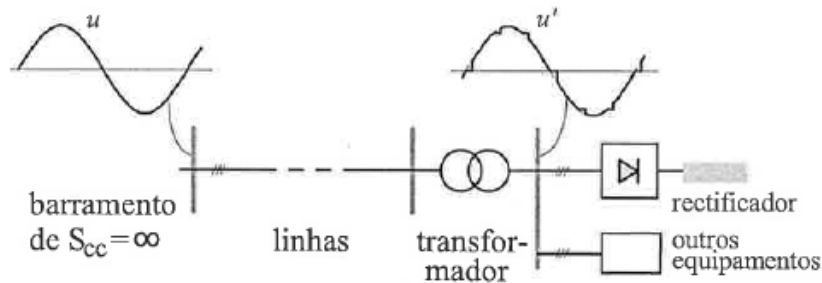


Figura 4.3 – Exemplo com deformação da tensão entre fases causada pela comutação dos díodos num retificador trifásico em ponte não controlado [29].

O retificador trifásico em ponte apresenta uma tensão na sua saída com uma componente contínua e a quantificação da distorção do seu sinal é dado pelo Fator de tremor (Anexo F).

4.2. Modelo do Retificador Dodecafásico não Controlado

Normalmente associam-se circuitos de retificação com o objetivo de aumentar o índice de pulsação p e assim diminuir o *ripple* da tensão retificada, obter correntes alternadas com menor teor harmónico e fazer a subdivisão de tensões ou correntes pelos vários circuitos associados. Estes objetivos são alcançados associando circuitos do mesmo tipo com as tensões retificadas por cada uma adequadamente desfasadas entre si. Tais desfasamentos têm de ser estabelecidos nas fontes de tensão alternada dos retificadores, o que na prática são obtidos com esquemas apropriados dos transformadores de retificação [29].

A associação de dois retificadores trifásicos em ponte permite obter uma montagem global com índice de pulsação p igual a 12. Como cada ponte trifásica apresenta uma tensão retificada com período igual a $\pi/3$ na escala de ωt , há que encontrar fontes trifásicas de tensão desfasadas de $\pi/6$. Uma forma expedita de o conseguir consiste na

utilização de um transformador de três enrolamentos com ligações Y-y-d, através dos fasores das tensões esse desfasamento é obtido [29].

Dentro da zona de funcionamento independente dos conversores, conseguem-se melhorias nas formas das grandezas convertidas de tensão retificada de saída e corrente na linha. A Figura 4.4 representa o modelo da associação de duas pontes retificadoras trifásicas em paralelo com os dois secundários do transformador.

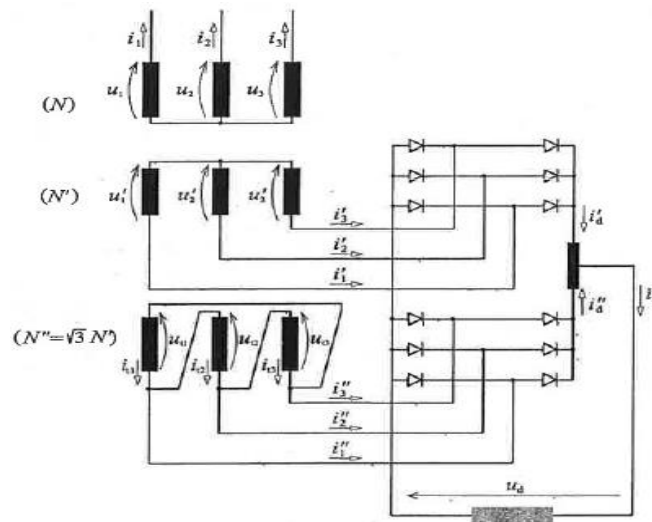


Figura 4. 4 - Modelo da associação de duas pontes trifásicas em paralelo com o transformador [29].

A forma de onda em regime permanente da tensão retificada de saída e da corrente de entrada tal como o processo de desfasamento das tensões criadas pela utilização do transformador de três enrolamentos é comprovado nas Figuras (4.5) e (4.6) [29].

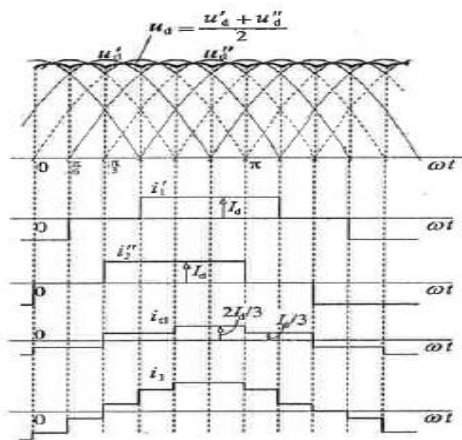


Figura 4. 5 - Formas de onda da tensão e corrente retificada em regime permanente [18].

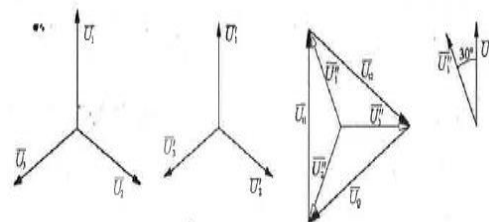


Figura 4. 6 – Vetores com o desfasamento das tensões aplicadas nos retificadores [29].

4.3. Esquema Geral de Ligação do Modelo do Retificador não Controlado

Para manter a corrente DC imposta em cada um dos conversores associados, podem inserir-se bobinas em série com cada qual. Geralmente utiliza-se uma bobina com dois enrolamentos no nó de partilha de carga, embora pudesse existir duas bobinas, uma em série com cada retificador. Esta solução de uma bobina com dois enrolamentos sobre um único núcleo chamada bobina repartidora (bobina interfásica) ou bobina de sucção, ou ainda transformador interfase, permite que o efeito magnetizante da componente contínua de corrente em ambos os conversores, se anule mutuamente, evitando a saturação do núcleo da bobina que, assim manterá um coeficiente de autoindução elevado necessário para atenuar uma corrente de circulação que vai existir. A explicação anterior está descrita na Figura 4.7 com a circulação das correntes de saída i'_d e i''_d de cada retificador e repartição da corrente i_d [29].

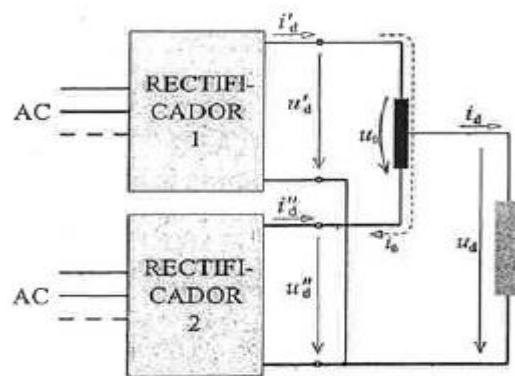


Figura 4. 7 - Esquema de ligações do modelo do retificador em paralelo utilizando bobina interfásica [18].

Em regime permanente a forma da tensão retificada resultante da tensão aplicada à bobina interfásica e da corrente é ilustrada na Figura 4.8.

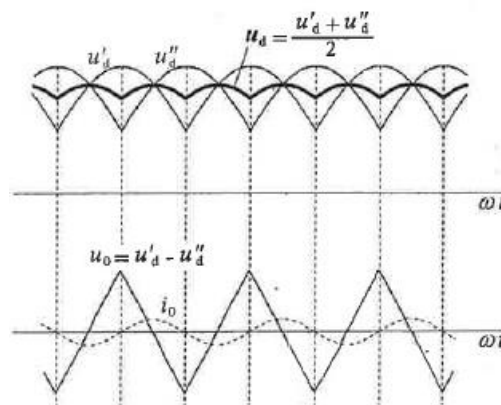


Figura 4. 8 - Forma da tensão retificada [29].

Havendo corrente imposta em cada conversor associado, este mantém o seu funcionamento normal, apresentando a tensão retificada que o caracteriza. Os retificadores associados têm de ser tais que apresentem tensões u_d' e u_d'' com igual valor médio, mas desfasadas entre si de metade do período. Assim, entre os terminais extremos da bobina interfásica aparece uma tensão u_0 (Figura 4.7) correspondente à diferença entre u_d' e u_d'' , que é uma tensão alternada de valor médio nulo. Por conseguinte a componente de corrente i_0 que circula entre um conversor e o outro é também alternada e resulta de u_0 atenuada pela auto-indução total da bobina interfásica como se pode verificar na Figura 3.8 [29].

A tensão na carga corresponde ao valor médio entre tensões instantâneas u_d' e u_d'' . O seu valor médio é igual aos das retificações associadas, enquanto que o valor médio em cada retificador virá igual a metade do valor médio da corrente na carga de acordo com as equações (4.6), (4.7) e (4.8).

$$U_d' = U_d'' = U_d \quad (4.6)$$

$$I_d' = I_d'' = \frac{I_d}{2} \quad (4.7)$$

$$u_d = \frac{u_d' + u_d''}{2} \quad (4.8)$$

O período T_{ud} da tensão na carga é de $\pi/6$, resultado do cálculo de $T_{u_d} = \frac{2\pi}{12} = \frac{\pi}{6}$

De referir que os retificadores associados irão manter-se em funcionamento independente desde que a corrente da carga I_d nunca se torne inferior ao valor de pico da componente de circulação i_0 [29].

4.4. Ondulador de Tensão Trifásico em Ponte

Os onduladores de tensão são conversores que aceitam grandezas unidirecionais (DC) impostas de um lado e grandezas bidirecionais (AC) impostas do outro. Com estes conversores é possível elaborar tensões ou correntes alternadas a partir de grandezas contínuas da mesma espécie impostas e, ao mesmo tempo, elaborar grandezas contínuas a partir das grandezas alternada correspondentes impostas [13].

Quando as grandezas contínuas impostas são correntes é designado ondulador de corrente. Estes conversores requerem dispositivos comutáveis, ou seja, com capacidade de comando ao fecho e à abertura a partir de sinais de comando externos, como sejam o IGBT, MOSFET ou o tiristor GTO [29].

O ondulador de tensão trifásico em ponte, cujo esquema de princípio é apresentado na Figura 4.9, corresponde à associação de três onduladores monofásicos de ponto médio. Os onduladores de tensão com IGBTs na função de dispositivos interruptores, é atualmente o mais usado em acionamentos com máquinas assíncronas.

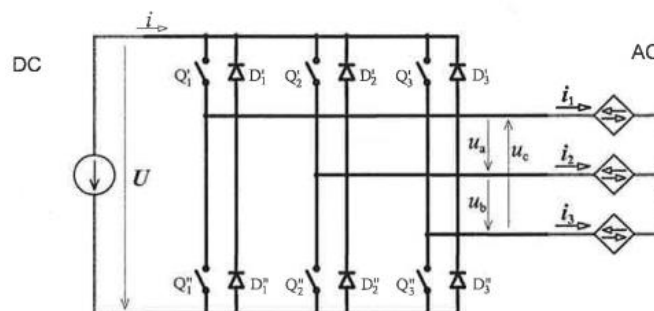


Figura 4. 9 – Ondulador de tensão trifásico em ponte [29].

4.5. Sistema de Acionamento com Máquinas Assíncronas Trifásicas

O motor de indução trifásico de rotor em gaiola de esquilo é o tipo de máquina mais utilizado em acionamentos de velocidade fixa e começa a ser um dos mais utilizados em velocidade variável. Os motores de indução trifásicos em gaiola de esquilo têm enrolamentos trifásicos no estator, distribuídos em cavas ao longo do entreferro, com estrutura aproximadamente sinusoidal por fase. Os circuitos do rotor consistem em barras uniformemente dispostas em furos axiais na periferia do rotor, e todas interligadas entre

si nos topos. A Figura 4.11 representa o esquema equivalente por fase do motor assíncrono trifásico com indicação do balanço de potências [18].

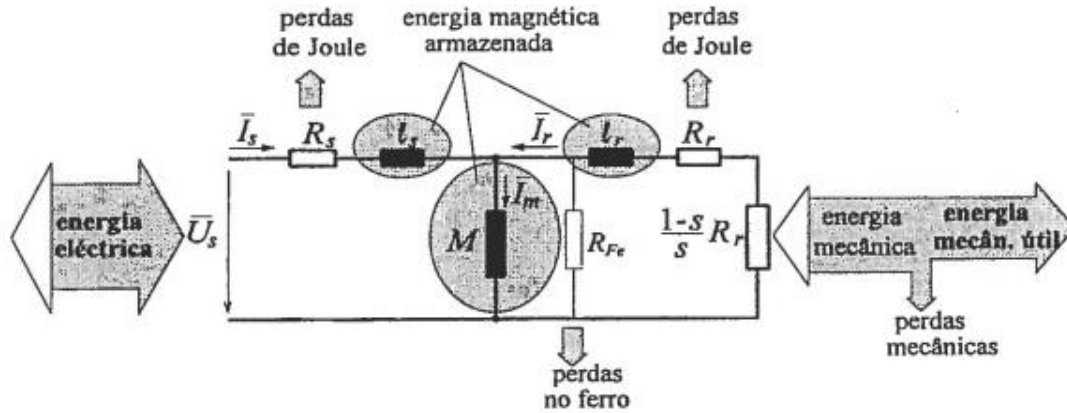


Figura 4. 10 – Esquema equivalente por fase do motor assíncrono trifásico [29].

As resistências do estator e rotor, respectivamente R_s e R_r contribuem para as perdas por efeito de Joule. O elemento representado na forma de $R_s \frac{1-s}{s}$ permite descrever o fenómeno da conversão eletromecânica de energia. A potência total convertida em potência mecânica nas três fases exprime-se pela equação (4.9) [29].

$$P = 3I_r^2 R_r \frac{1-s}{s} \quad (4.9)$$

O binário motor desenvolvido é representado por (4.10). Este binário motor depende da potência total P e velocidade angular mecânica ω_m

$$T = \frac{P}{\omega_m} \quad (4.10)$$

A velocidade angular mecânica ω_m é obtida pela equação (4.11) e depende da velocidade angular do rotor ω_r e do número de par de pólos n_{pp} .

$$\omega_m = \frac{\omega_r}{n_{pp}} \quad (4.11)$$

O escorregamento é dado pela equação (4.12).

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (4.12)$$

A velocidade angular do rotor é expressa pela equação (4.13).

$$\omega_r = (1 - s)\omega_s \quad (4.13)$$

Substituindo as equações (4.11) e (4.13) em (4.10) obtém-se (4.14) para o binário motor T .

$$T = n_{pp} \frac{P}{\omega_r} = 3n_{pp} \frac{R_r}{s\omega_s} I_r^2 \quad (4.14)$$

Se for desprezada a corrente no ramo da indutância mútua, de forma aproximada, o binário pode ser expresso em função do escorregamento (4.15).

$$T \approx \frac{3n_{pp}R_rU_s^2}{s\omega_s \left[\left(R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + \omega_s^2(l_s + l_r)^2 \right]} = \frac{3n_{pp}R_rU_s^2}{(\omega_s - \omega_r) \left[\left(R_s + \frac{R_r}{s} \right)^2 + \omega_s^2(l_s + l_r)^2 \right]} \quad (4.15)$$

Onde n_{pp} representa o número de par de polos por fase e ω_r é a velocidade angular do rotor [22].

O fluxo magnético e a corrente de magnetização são apresentadas respetivamente pelas equações (4.16) e (4.17).

$$\Psi_m = MI_m \quad (4.16)$$

$$I_m \approx \frac{U_s}{\omega_s M} \quad (4.17)$$

Substituindo (4.17) em (4.16) obtém-se a equação (4.18) para o fluxo magnético Ψ_m .

$$\Psi_m \approx \frac{U_s}{\omega_s} \quad (4.18)$$

Considerando apenas as perdas de Joule, o rendimento da conversão em funcionamento como motor ($s > 0$) exprime-se de forma aproximada pela equação (4.19).

$$\eta = \frac{R_r \frac{1-s}{s}}{R_s + \frac{R_r}{s}} \approx 1 - s \quad (4.19)$$

Se for admissível tomar $R_s \ll R_r/s$ conclui-se que o rendimento degrada-se proporcionalmente com o escorregamento. A Figura 4.11 representa o aspeto típico da evolução do rendimento num motor de rotor em gaiola, em função do escorregamento, ilustrando o significado da aproximação $\eta \approx 1 - s$. O ponto de máximo rendimento encontra-se na situação de funcionamento nominal, ou muito próximo desta [29].

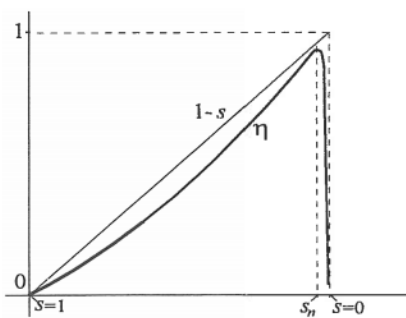


Figura 4. 11 – Aspeto típico do diagrama de rendimento de um motor de rotor em gaiola [29].

4.8. Modelo da Linha de Transmissão (terceiro carril)

A linha do Metro será alimentado pelo terceiro carril e para a sua representação em modelo de simulação foi usado uma resistência e uma indutância tal como pode ser observado na Figura 4.14.

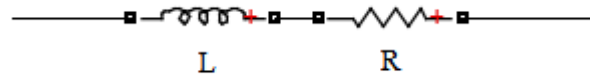


Figura 4. 14 – Modelo de simulação da linha do Metro.

Os parâmetros da resistência (R) e indutância (L) podem ser encontrados na Tabela 5.4 sendo que os mesmos são dados fornecidos pelo Metropolitano de Lisboa e serviram para implementação e simulação do modelo com os dados reais.

4.9. Resistência Equivalente da Carga R_o

A resistência equivalente da carga R_o representa de forma aproximada toda dinâmica e impedância de entrada do sistema de alimentação da locomotiva pelo terceiro carril (Figura 2.22).

Capítulo 5

Resultados de Simulação

Numérica e Experimentais

O presente capítulo descreve o modelo da simulação numérica, a implementação laboratorial, os resultados obtidos, a sua comparação e validação.

5. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAIS

5.1. Modelo de Simulação Numérica e os seus Parâmetros

De forma a validar os modelos obtidos nos capítulos 3 e 4 foi feita a simulação numérica e experimental, respetivamente com recurso ao software *Matlab/Simulink* com a toolbox *Simscape/Power Systems/Specialized Technology*.

O esquema global da simulação numérica da subestação de tração DC inclui um transformador trifásico com dois secundários em ligação Y(Y|D) que tem como função alimentar o retificador dodecafásico não controlado, bobina interfásica e sua respetiva carga conforme representado nas Figuras 4.4 e 4.7.

A Figura 5.1 representa o diagrama global para simulação da subestação de tração DC e seus elementos constituintes.

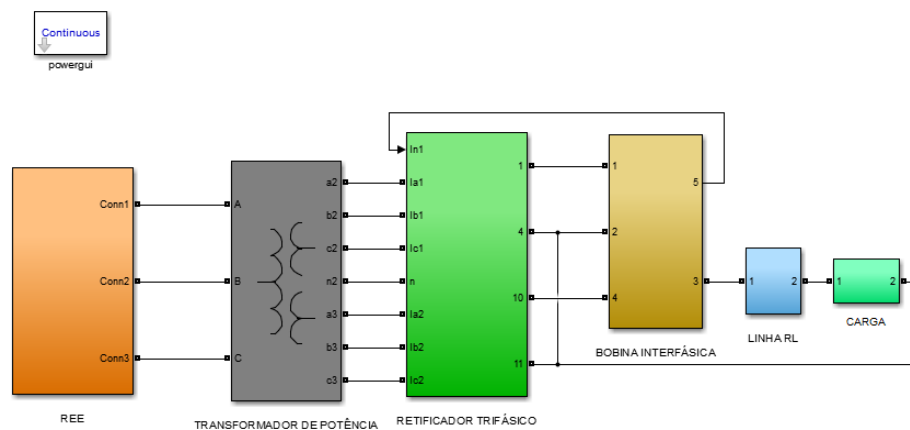


Figura 5. 1 - Diagrama global do modelo da subestação de tração

Está representado na Figura 5.2, o subsistema da rede de energia elétrica para alimentar o transformador de potência.

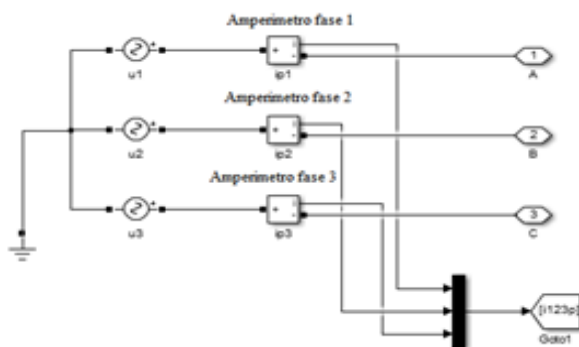


Figura 5. 2 – Representação do subsistema da rede de energia elétrica.

O subsistema da rede de energia elétrica é composto por um sistema de tensões trifásicas sinusoidais sem harmônicas desfasadas entre si de 120° e estão representados os seus respetivos parâmetros de tensão na Tabela 5.1.

Tabela 5. 1 – Parâmetros da rede de energia elétrica.

Frequência da rede de energia elétrica	50 Hz
Ângulo de fase 1	$0^\circ + 90^\circ$
Ângulo de fase 2	$-120^\circ + 90^\circ$
Ângulo de fase 3	$-240^\circ + 90^\circ$
Amplitude da tensão (kV)	30

O transformador de potência tem como função a redução do nível de tensão e por sua vez são alimentados os retificadores trifásicos em ponte. A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros do transformador de potência com ligações (D|YD).

Tabela 5. 2 – Parâmetros do transformador de potência [31].

Descrição	MT (D)	BT(y)	BT (d)
Potência (kVA)	2398	1240	1240
Tensão (Vca)	30000	585	585
Corrente (A)	46,15	1224	1224

Os retificadores trifásicos em ponte não controlados têm como função a retificação do sinal de entrada AC em um sinal DC na sua saída de forma a alimentar o terceiro carril. São apresentados na Figura 5.3 os parâmetros usados no modelo dos retificadores trifásicos.

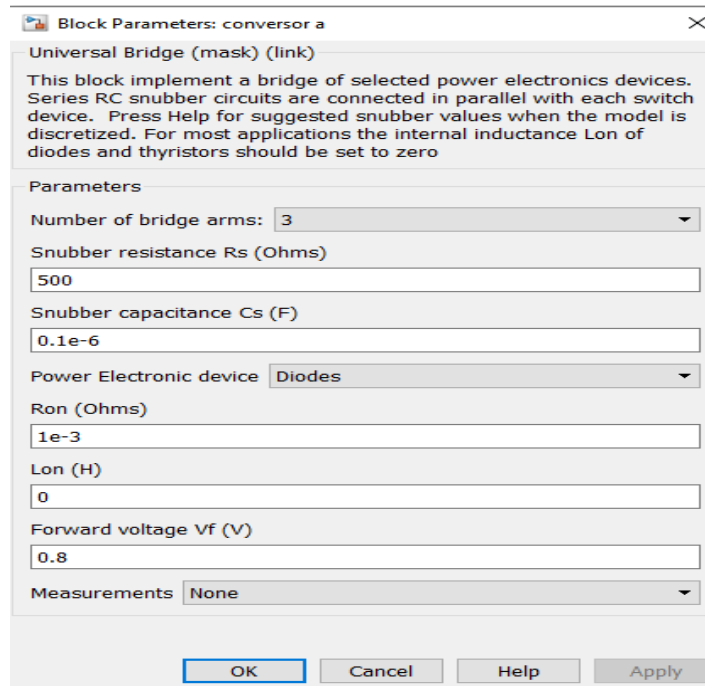


Figura 5. 3 – Parâmetros dos retificadores trifásicos em ponte não controlados [32].

A Figura 5.4 representa a bobina interfásica de 250 mH ligada entre os dois retificadores trifásicos em ponte não controlados que funcionam em regime não lacunar e onde se podem observar os seus parâmetros na Tabela 5.3.

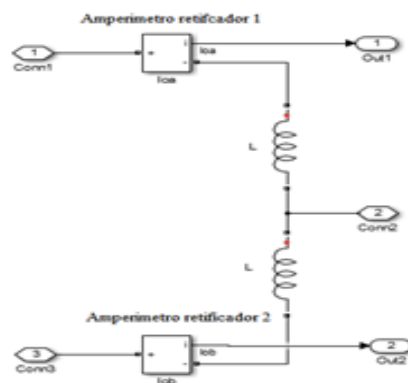


Figura 5. 4 – Representação da bobina interfásica.

Tabela 5. 3 – Parâmetros da bobina interfásica [31].

Tensão de isolamento	3 kV
Corrente nominal	3000 Acc
Desequilíbrio	<15%

O modelo da linha bem como o da carga equivalente do Metro são apresentados respectivamente nas Figuras 5.5 e Figura 5.6 e os seus parâmetros podem ser verificados nas Tabelas 5.4 e 5.5.

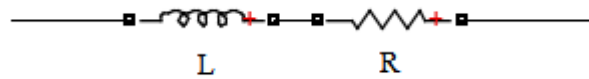


Figura 5. 5 – Modelo da linha de Metro.

Tabela 5. 4 – Parâmetros da linha 3º carril [31].

Resistência 3º carril	14 mΩ/km
Gama de tensão	625 -1000 Vcc
Indutância da linha	1,8 mH

Para o dimensionamento da resistência equivalente da carga R_0 teve-se em conta o valor da potência instalada para uma carruagem do metro ML 99 (dados técnicos no Anexo A) e os seus cálculos podem ser analisados no Anexo E. Esta resistência equivalente R_0 representa de forma aproximada toda dinâmica e impedância de entrada do sistema de alimentação da locomotiva pelo terceiro carril (Figura 2.22).

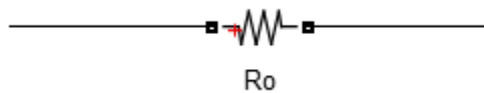


Figura 5. 6 – Modelo equivalente da carga.

Tabela 5. 5 – Parâmetros da carga.

Resistência (R_0)	891 mΩ
-----------------------	--------

5.1.1. Resultados da Simulação Numérica com os Parâmetros do Metro

A Figura 5.7 representa a evolução temporal em regime permanente numa fase da corrente i_p na entrada do primário do transformador de potência onde é possível verificar os valores máximos e mínimos da corrente bem como a sua distorção.

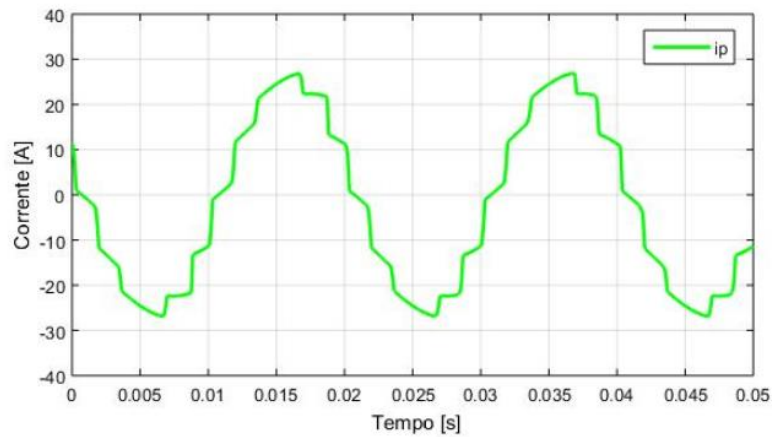


Figura 5. 7 – Corrente de entrada do primário i_p em regime permanente do transformador com ligação em triângulo.

Na Figura 5.8 encontram-se representadas as evoluções temporais numa fase em regime permanente da tensão simples u_a e da corrente i_a de entrada do retificador trifásico em ponte não controlado. Pode-se observar a influência do retificador no sinal da corrente passando a ser relativamente mais próxima de uma onda quadrada.

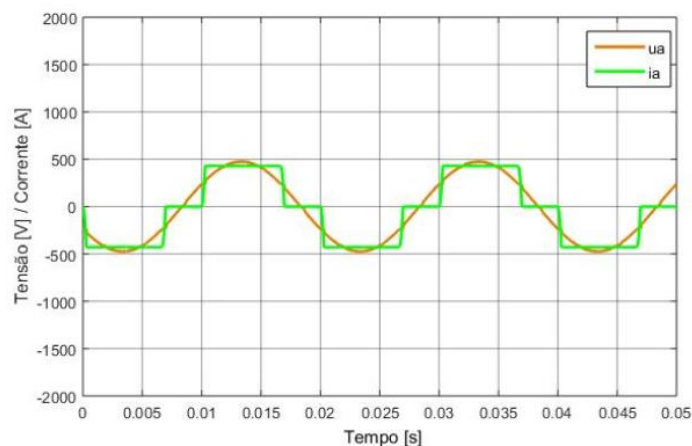


Figura 5. 8 – Tensão u_a e corrente i_a numa fase em regime permanente de entrada do retificador trifásico.

Na Figura 5.9 apresentam-se em regime permanente as evoluções temporais da tensão simples u_a das correntes de entrada i_a e i_b nas fases dos retificadores e onde é possível ser observado um desfasamento entre elas de 30° .

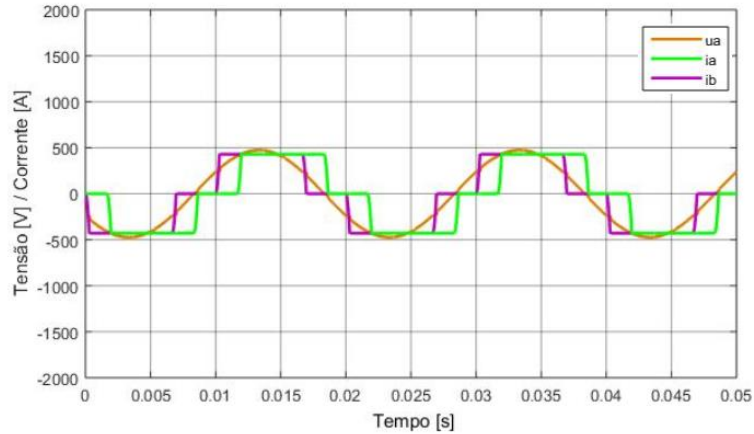


Figura 5. 9 – Tensão simples u_a e correntes i_a e i_b de entrada em regime permanente nos retificadores.

Na Figura 5.10 encontra-se representada em regime permanente a evolução temporal com a composição das correntes na entrada dos retificadores, sendo que o transformador irá ver no seu primário a desfasagem mais próxima de 30° permitindo a eliminação de determinadas frequências das correntes harmónicas. Com a composição das correntes na entrada dos retificadores trifásicos, verifica-se a soma individual das correntes nos retificadores gerando assim uma amplitude máxima da primeira harmónica de corrente aproximadamente na ordem dos 880 A.

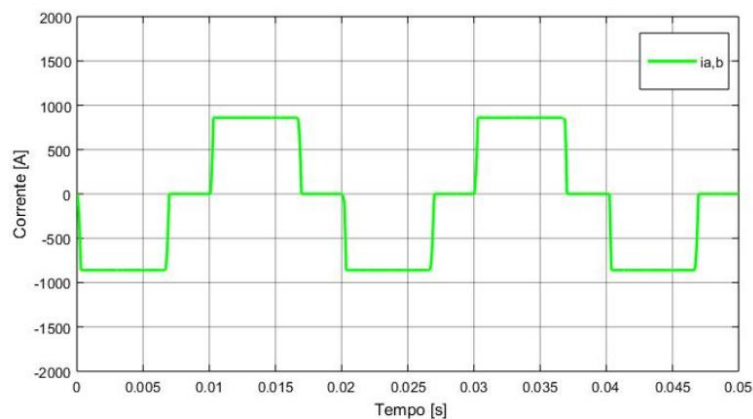


Figura 5. 10 – Evolução temporal da composição das correntes i_a e i_b de entrada dos retificadores.

Na Figura 5.11 encontra-se representado a evolução temporal em regime permanente da tensão u_{0a} e da corrente i_{0a} saída do retificador trifásico em ponte não controlado. Na análise da Figura 5.11 é possível verificar os valores da tensão e corrente situados respetivamente entre 790V e 443A, e verificar ainda o alisamento da corrente i_{0a} resultante da influência da bobina interfásica (Figura 5.4).

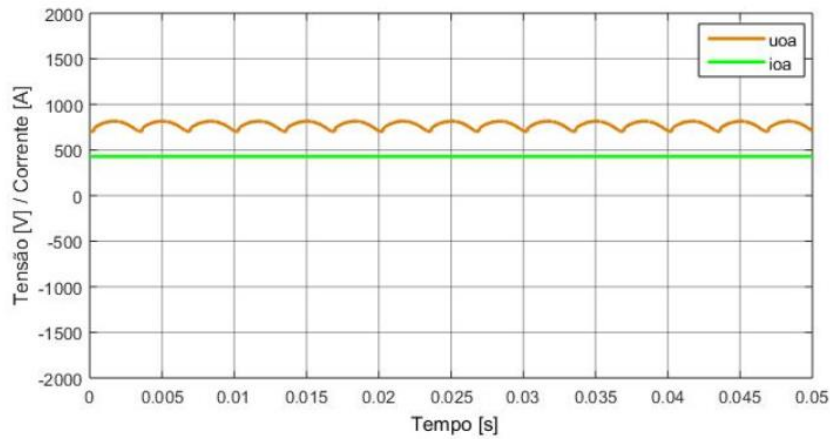


Figura 5. 11 – Evolução temporal da tensão u_{0a} e corrente de saída i_{0a} do retificador trifásico.

Na Figura 5.12 encontram-se representadas as evoluções temporais das tensões u_{0a} e u_{0b} e correntes i_{0a} e i_{0b} sobrepostas a saída dos retificadores trifásicos em regime permanente, onde verifica-se uma desfasagem entre as tensões de 30° e sob influência da bobina interfásica o alisamento das correntes.

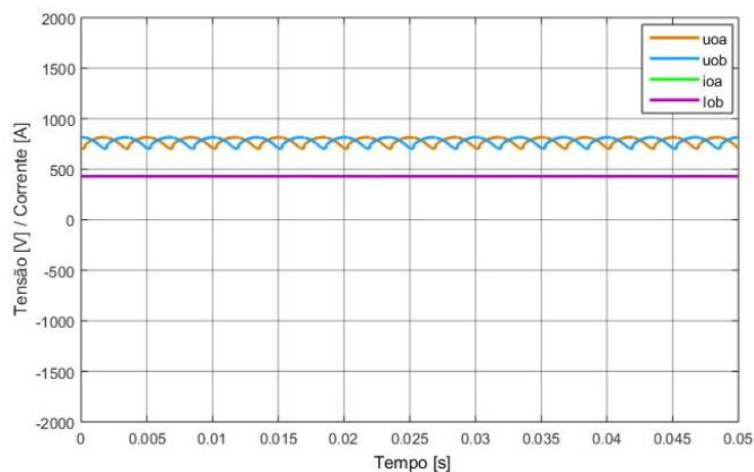


Figura 5. 12 – Evolução temporal em regime permanente das tensões u_{0a} e u_{0b} e correntes i_{0a} e i_{0b} sobrepostas de saída dos retificadores trifásicos.

Na Figura 5.13 encontra-se representado a evolução temporal em regime permanente da tensão u_0 e a corrente i_0 na carga onde o valor médio da tensão à saída do retificador trifásico em ponte não controlado de acordo a equação 4.4 é de 790V e o valor médio da corrente na carga tem um valor de 886A, resultante da contribuição da corrente de cada retificador. A amplitude da tensão u_0 e corrente i_0 encontram-se alisadas e com tremor praticamente nulo, em resultado das bobinas interfásicas. Estas bobinas interfásicas garantem o alisamento quer da tensão e corrente permitindo ainda a continuidade da corrente na carga.

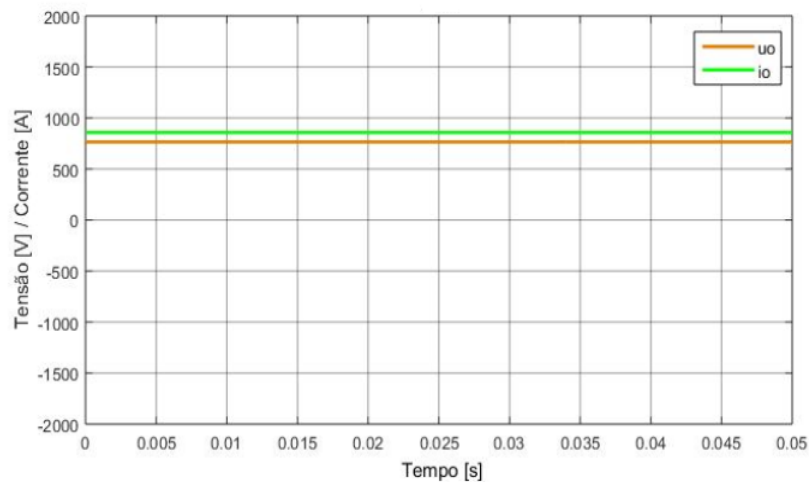


Figura 5. 13 – Evolução temporal em regime permanente da tensão u_0 e corrente i_0 na carga.

Na Figura 5.14 encontra-se representado o espectro da corrente i_{p1} à entrada do transformador de ligação em triângulo, onde se pode observar a amplitude da harmónica de frequência fundamental (50Hz) e as suas múltiplas. Verifica-se que a *THD* da corrente é de 7,66% (obtida por simulação numérica) que corresponde a uma *TDD* de 7,63% (calculada matematicamente com a equação 3.18). Este valor não representa de acordo a IEEE-519 (Tabela 3.2) um valor preocupante sendo que o limite estabelecido pela norma é de 5% vezes 1,5 para medição semanal, correspondendo a uma *TDD* de 7,5% e o valor excedido é de 0,13%. A norma IEEE 519-2014 na página 7 estabelece que: “*Weekly 99th percentile short time (10 min) harmonic currents should be less than 1,5 times the value given in Table 3.2*”.

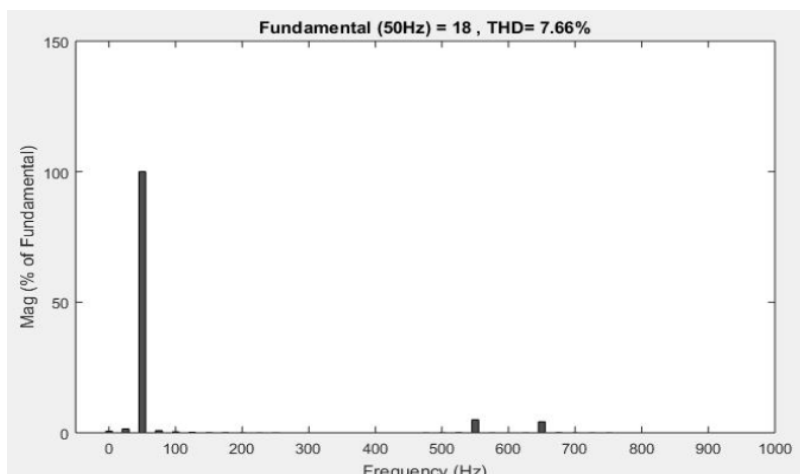


Figura 5. 14 – Espectro da corrente i_{p1} na entrada do transformador com ligação em triângulo.

Na Figura 5.15 encontra-se representado o espectro da tensão simples u_1 de entrada do retificador trifásico em ponte onde se verifica a amplitude da primeira harmónica (50Hz) e as suas múltiplas que vão reduzindo de amplitude com o aumento da frequência. A amplitude das restantes harmónicas é relativamente reduzida o que se traduz num reduzido valor da *THD* de 1,13%.

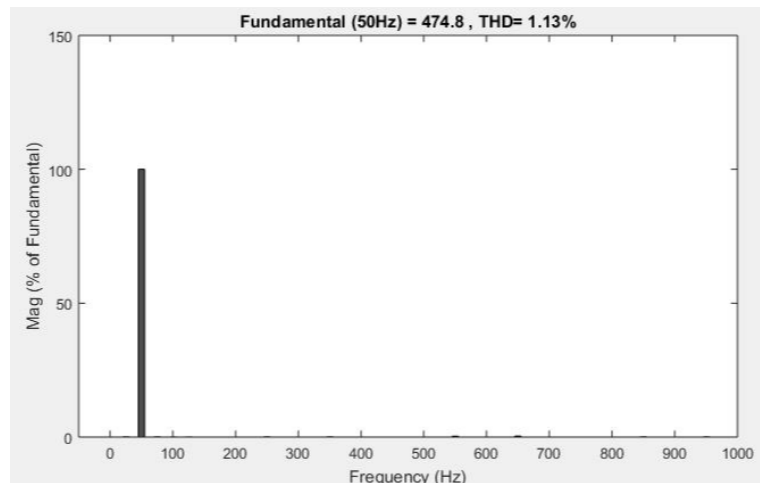


Figura 5. 15 – Espectro da tensão simples u_1 de entrada do retificador trifásico em ponte.

Na Figura 5.16 encontra-se representado o espectro da tensão u_{01} saída do retificador trifásico em ponte não controlado com uma *THD* no valor de 6,33% (neste processo de cálculo com a equação (3.13) está excluído a componente contínua DC). A análise da Figura 5.16 identifica ainda a amplitude da componente contínua DC bem como a amplitude da harmónica da frequência fundamental (300Hz) e as suas múltiplas.

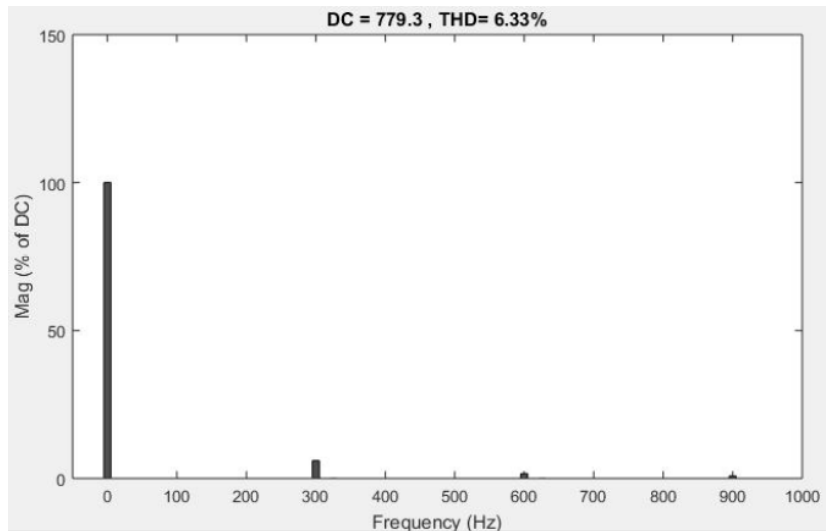


Figura 5. 16 – Espectro de tensão u_{o1} à saída do retificador trifásico em ponte.

Na Figura 5.17 encontra-se representado o espectro da corrente i_{a1} à entrada do retificador trifásico em ponte onde se observa a amplitude da harmónica de frequência fundamental (50Hz) e as suas múltiplas que vão reduzindo a sua amplitude harmónica de acordo com o aumento da frequência. Verifica-se que a *THD* da corrente é de 29,61% correspondendo a uma *TDD* de 28,39% (calculada matematicamente com a equação (3.18)). Este valor representa de acordo a IEEE-519 (Tabela 3.2) um valor relativamente preocupante sendo que excede o limite estabelecido pela mesma norma que é de 5% vezes 1,5 para medição semanal, correspondendo a uma *TDD* de 7,5%. A norma IEEE 519-2014 na página 7 estabelece que: “*Weekly 99th percentile short time (10 min) harmonic currents should be less than 1,5 times the value given in Table 3.2*”.

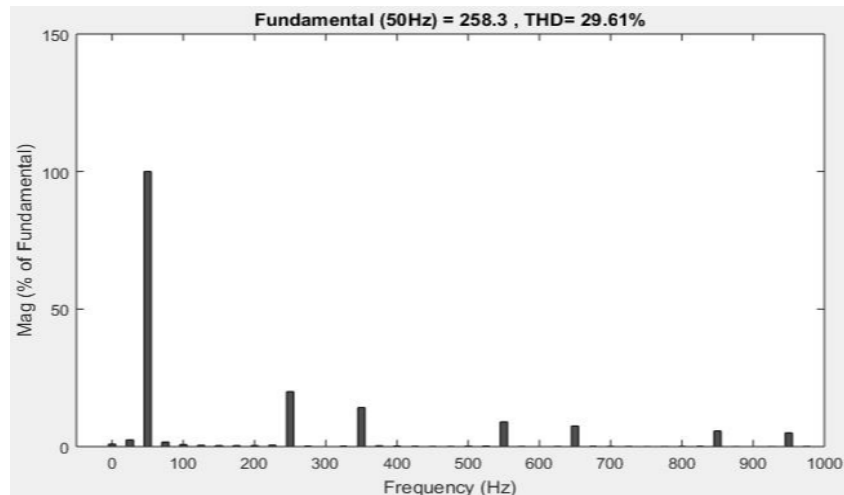


Figura 5. 17 – Espectro da corrente i_{d1} de entrada do retificador trifásico.

A simulação numérica com os parâmetros reais (maioritariamente fornecidos pelo Metropolitano de Lisboa) permite obter resultados equivalentes quando operado em ambiente real. Estes resultados permitem depois efetuar uma comparação com resultados obtidos numa escala reduzida e implementada com um protótipo em laboratório. Embora sejam com potências e parâmetros diferentes, mas na análise harmónica podemos esperar ter espectros idênticos, bem como as suas quantificações (taxas de distorção harmónica) em termos percentuais. O modelo do esquema geral para a simulação com os dados reais pode ser verificado no Anexo C onde é possível ser observado a constituição geral da SST.

5.1.2. Implementação Laboratorial

Foi implementado um protótipo experimental a uma escala de potência reduzida de acordo as condições laboratoriais, utilizando transformadores de potência e retificadores trifásicos em ponte não controlados de forma a alimentar a carga tal como pode ser observado no esquema geral de ligação na Figura 5.18. É possível ainda observar-se na Figura 5.18 a representação da bobina interfásica que encontra-se conectada entre os retificadores.

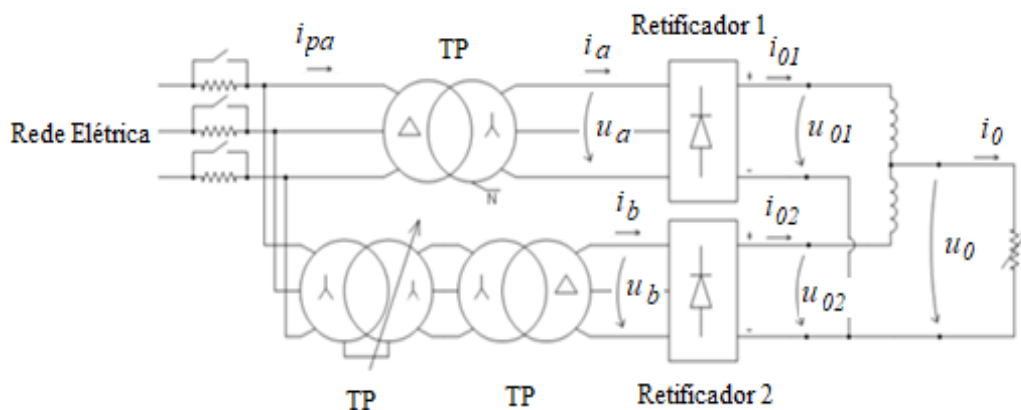


Figura 5. 18 – Esquema de geral de ligação da Subestação de Tração.

A interligação dos equipamentos com a rede elétrica foi realizada com a utilização do autotransformador trifásico da marca REGAVOLT que pode ser observado na Figura 5.19. O mesmo possibilita a regulação da tensão de saída entre os 0 e 450V com uma corrente máxima por fase de 13A.



Figura 5. 19 – Autotransformador trifásico.

Ao autotransformador foi ligado a um transformador trifásico da marca SILICA-TEC com uma relação de transformação de 380/25V. No seu secundário foi ligado o retificador trifásico em ponte número dois (Figura 5.18), o retificador trifásico em ponte número 1 foi ligado no secundário de um outro transformador trifásico da mara JTS modelo 38241KJR com uma relação de transformação de 380/25V. As Figuras 5.20 e 5.21 representam nas suas saídas as ligações (Y|D) (Figura 5.18).

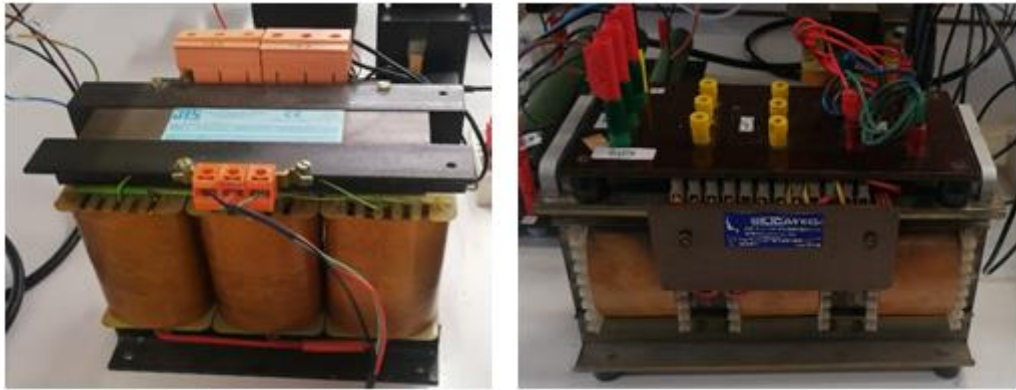


Figura 5. 20 – Transformador trifásico de ligação ao retificador 1. Figura 5. 21 – Transformador trifásico de ligação ao retificador 2.

Os retificadores trifásicos em ponte não controlados alimentados pelas saídas dos transformadores (Figuras 5.20 e 5.21) estão representados na Figura 5.22.

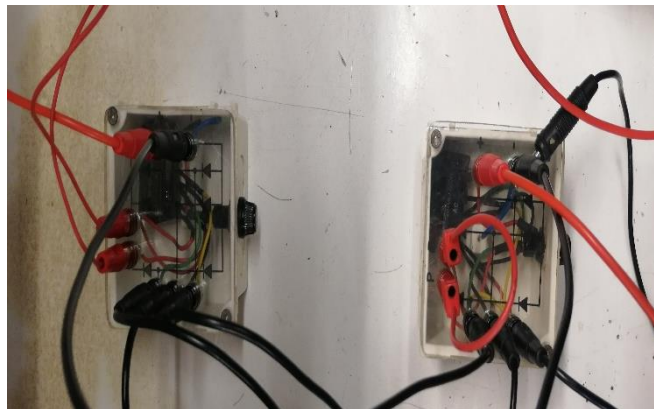


Figura 5. 22 – Retificadores trifásicos em ponte não controlados.

Na saída dos retificadores trifásicos foi ligada a bobina interfásica representada na Figura 5.23 e o seu respetivo parâmetro da indutância indicado na Tabela 5.6.

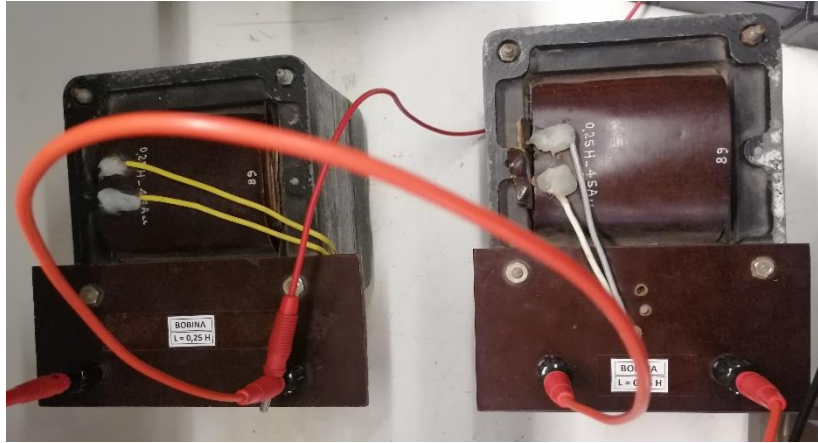


Figura 5. 23 – Bobina interfásica.

Tabela 5. 6 – Parâmetro da bobina interfásica.

Indutância (L)	0,25 H
----------------	--------

A carga representada na Figura 5.18 está indicada na Figura 5.24. Foi ligado um terminal da resistência na bobina interfásica e o outro terminal no terminal negativo comum da saída de cada retificador trifásico em ponte. De referir que os terminais negativos dos dois retificadores trifásicos estão ligados.



Figura 5. 24 – Resistência usada como carga.

Para a visualização temporal das principais grandezas a retirar foi utilizado o osciloscópio digital da marca Tektronix TDS 2014 representado na Figura 5.25, bem

como o analisador de qualidade de energia elétrica modelo TOPAS 1000 representado na Figura 5.26. Este analisador de qualidade de energia elétrica permitiu a aquisição dos dados para obtenção dos espectros de tensão e corrente na entrada e saída dos retificadores trifásicos em ponte. Toda esta informação obtida em laboratório vai permitir a comparação e validação dos modelos e resultados de simulação numérica.

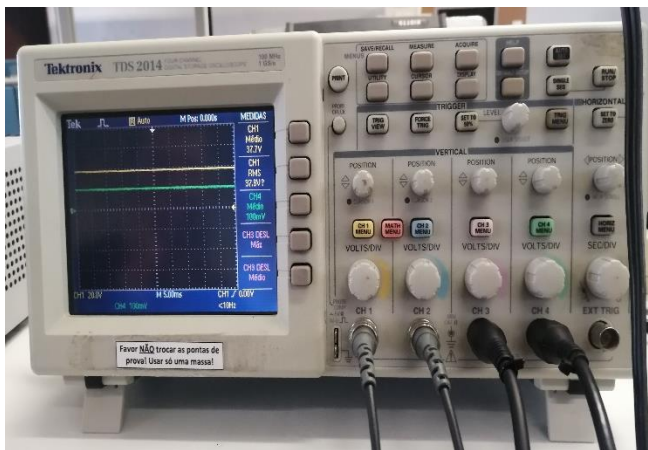


Figura 5. 25 – Osciloscópio digital.



Figura 5. 26 – Analisador de qualidade de energia, modelo TOPAS 1000.

5.2. Comparação entre Resultados de Simulação e Experimentais

Após a implementação laboratorial, foram realizados ensaios em simulação numérica com o *Matlab/Simulink* para análise do regime permanente do sistema. Desta forma pretende-se uma comparação entre resultados obtidos em laboratório e de simulação numérica para permitir a validação dos modelos matemáticos usados. Será, portanto, construído em *Matlab/Simulink* (Anexo B) um modelo equivalente ao esquema geral de ligação da Subestação de Tração representada na Figura 5.18. Na parametrização dos vários modelos são usados os valores do equipamento existente no Laboratório de Eletrónica Industrial. Para o sistema da rede elétrica são apresentados na Figura 5.27 os seus parâmetros utilizados.

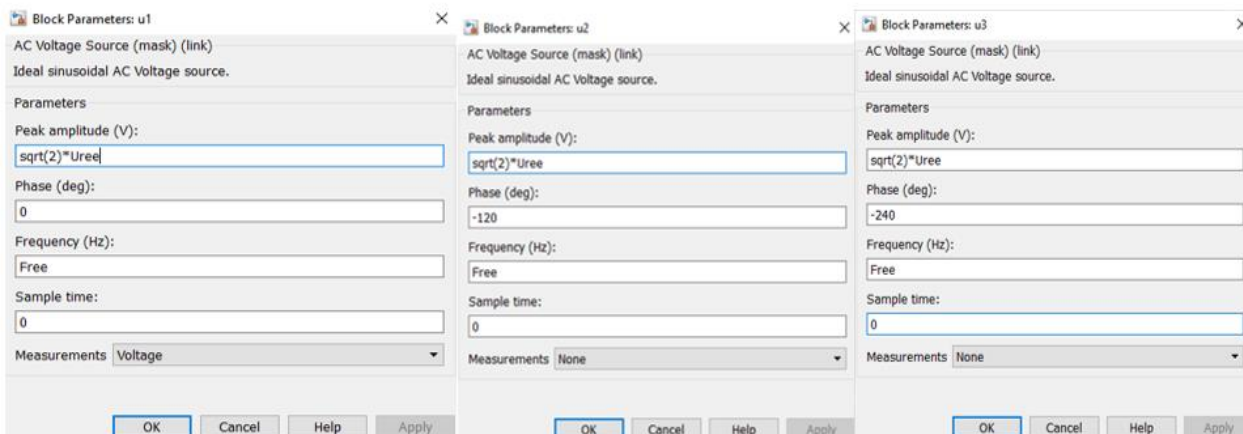


Figura 5. 27 – Representação dos parâmetros da rede elétrica para validação em simulação numérica.

Na Figura 5.28 estão igualmente representados os valores utilizadas para os parâmetros da rede elétrica.

```

%Parâmetros da Subestação de Tração DC
%REE
-   Uree=230;
-   Free=50;

```

Figura 5. 28 – Parâmetros da rede de energia elétrica de alimentação à SST.

A Figura 5.29 representa os parâmetros do transformador utilizado para validação dos resultados obtidos.

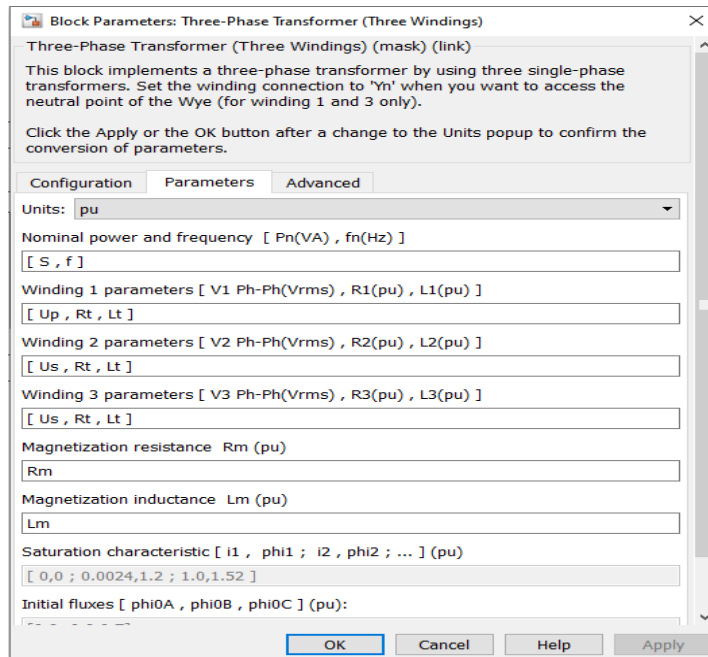


Figura 5. 29 – Representação dos parâmetros do transformador.

São apresentados na Figura 5.30 igualmente os parâmetros do transformador utilizado para a validação dos resultados obtidos.

```

%Parâmetros do Transformador
S=1e3;
f=50;
Up=380;
Us=25;
Rt=0.01;
Lt=0.015;
Rm=10;
Lm=10;

```

Figura 5. 30 – Parâmetros do transformador da SST.

De forma a efetuar a retificação do sinal elétrico trifásico à saída do transformador foi utilizado os parâmetros representados na Figura 5.31.

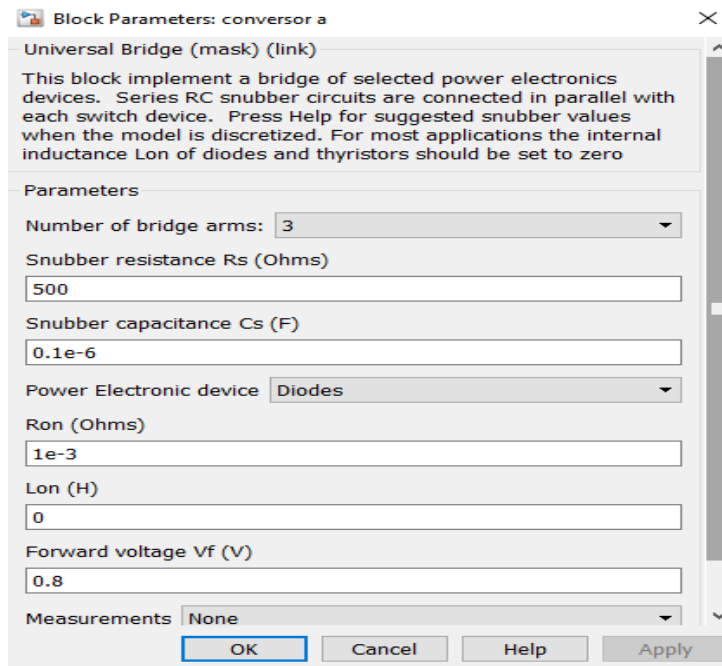


Figura 5. 31 – Parâmetros dos elementos constituintes do retificador trifásico em ponte.

Na Figura 5.32 está representada as equações para cálculo da carga equivalente R_{eq} utilizada para a simulação e validação dos resultados obtidos em laboratório. Foram utilizadas as equações (4.4), (4.5) e (4.8) obtidas no Capítulo 4.

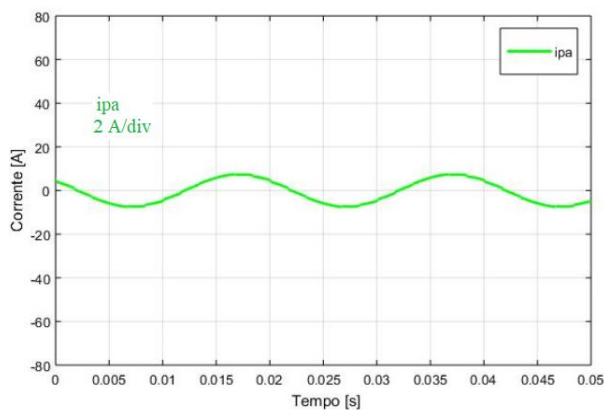
```

% Carga Equivalente
-   Uree=400;
-   m=380/25;
-   U=(Uree/m)/sqrt(3);
-   Uoav_a=3*sqrt(6)*U/pi;
-   Uoav_b=3*sqrt(6)*U/pi;
-   Uoav=(Uoav_a+Uoav_b)/2;
-   Ioav=1;
-   Req=Uoav/Ioav;

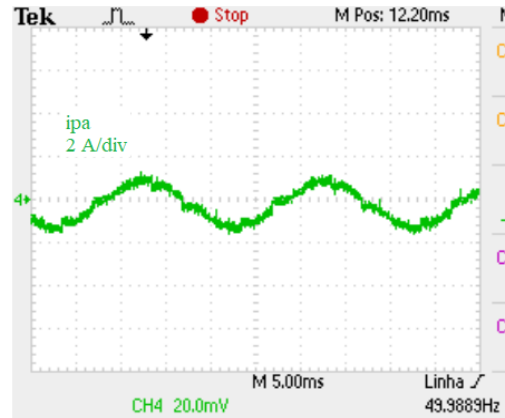
```

Figura 5. 32 – Parâmetros para cálculo da carga equivalente R_{eq} .

Na Figura 5.33 encontra-se representada a evolução temporal em regime permanente obtida por simulação e experimental da corrente i_{pa} de entrada do transformador com ligações em estrela. Para a Figura 5.33 a) em simulação numérica existe um ganho de 2A por divisão e é observado uma amplitude máxima de 1A. Para a Figura 5.33 b) obtida de forma experimental observa-se igualmente um ganho 2A por divisão. A contribuição da corrente de cada transformador é de 0,5A em valor médio.



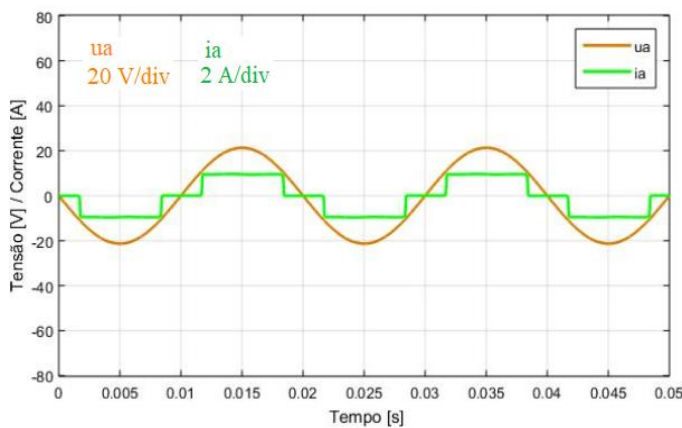
a)



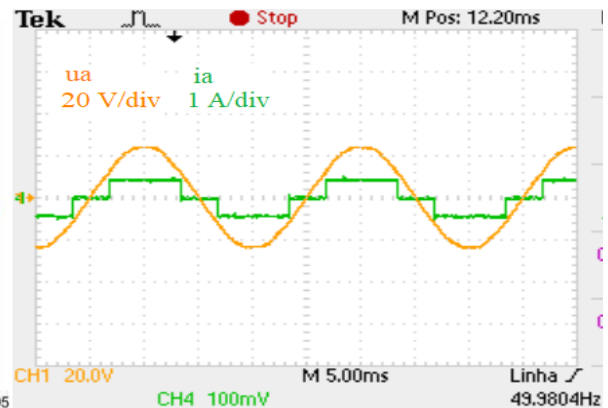
b)

Figura 5. 33 - Corrente de entrada i_{pa} do primário do transformador obtida por: a) Simulação; b) Experimental.

Na Figura 5.34 está representada em regime permanente obtida por simulação e experimental a tensão u_a e a corrente i_a de entrada do retificador trifásico em ponte 1 (Figura 5.18). É possível verificar que a sua evolução temporal bem como a contribuição da corrente à entrada do retificador 1 tem de 0,5A de valor médio.



a)



b)

Figura 5. 34 – Tensão u_a e corrente i_a de entrada do retificador obtidas por: a) Simulação; b) Experimental.

Na Figura 5.35 encontram-se representadas a tensão simples u_a as correntes i_a e i_b de entrada nos retificadores 1 e 2 (Figura 5.18) em regime permanente obtidas por

simulação e experimentais. É possível ser verificada a desfasagem de 30° entre as correntes i_a e i_b que como foi descrito no subcapítulo 4.2 permite uma redução do seu conteúdo harmónico.

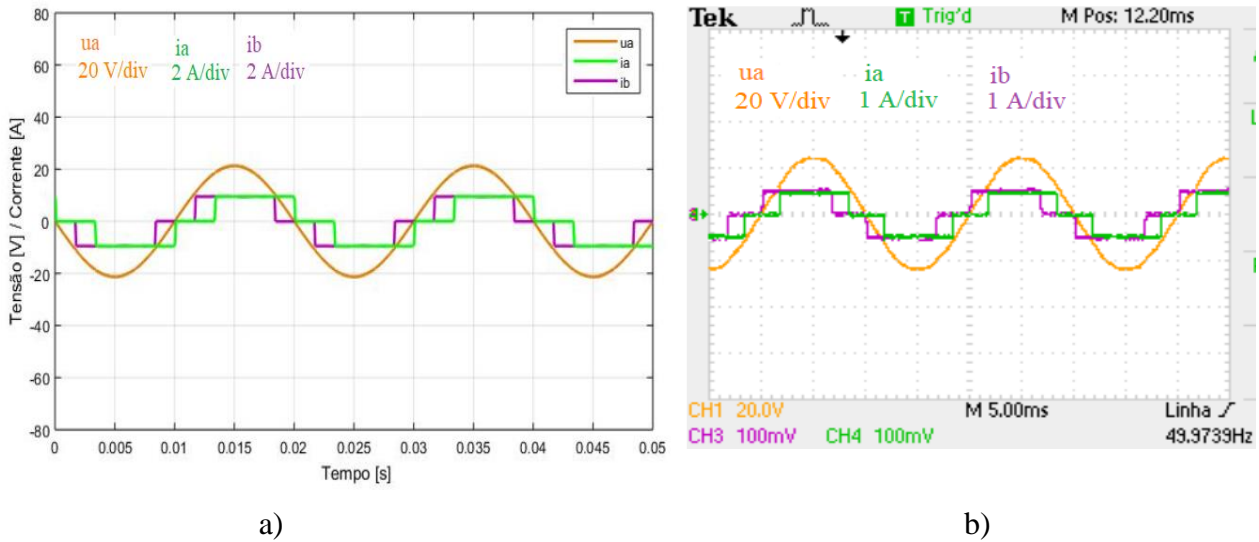


Figura 5. 35 – Tensão u_a e correntes i_a e i_b de entrada dos retificadores 1 e 2 obtidas por: a) Simulação; b) Experimental.

Na Figura 5.36 encontra-se representada a contribuição da corrente de cada retificador fazendo assim composição das correntes de entrada dos retificadores com uma amplitude máxima da corrente de 1A.

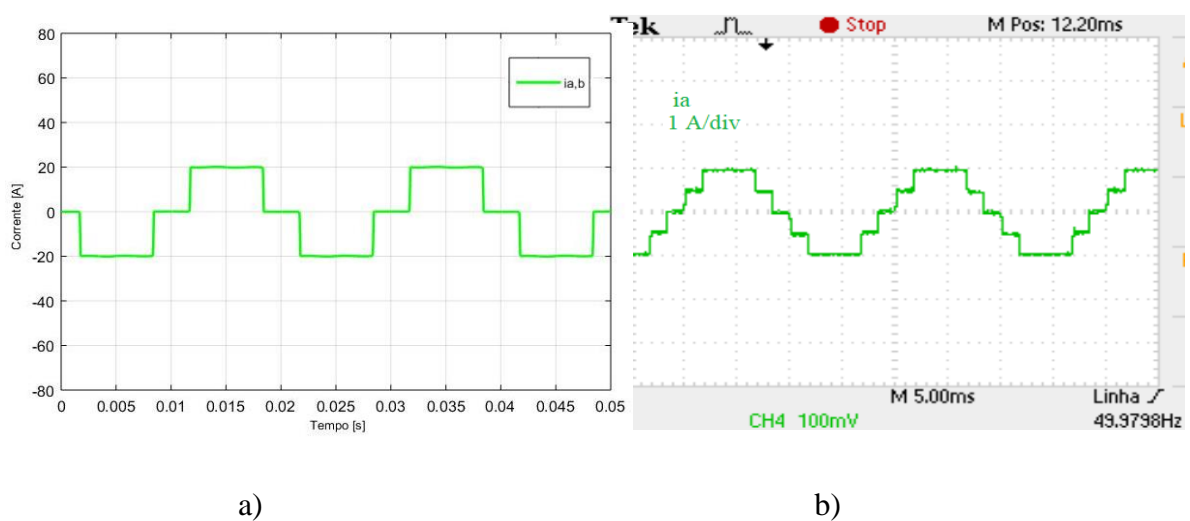


Figura 5. 36 – Composição da corrente i_a e i_b de entrada dos retificadores 1 e 2 obtida por: a) Simulação; b) Experimental.

Na Figura 5.37 encontra-se em regime permanente obtidas por simulação e experimentais a representação da evolução temporal da tensão u_{o1} e a corrente i_{o1} à saída do retificador trifásico em ponte. Verifica-se a influência da bobina interfásica no alisamento da corrente com ligeiras oscilações na Figura 5.37 b) (ensaio experimental).

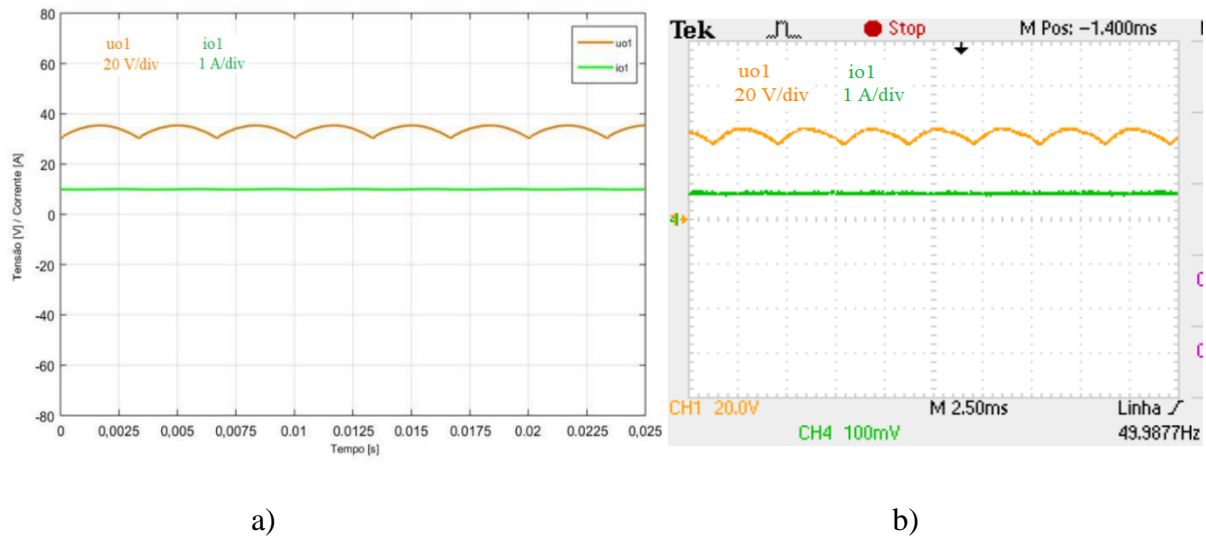


Figura 5. 37 – Tensão u_{o1} e corrente i_{o1} de saída do retificador obtidas por: a) Simulação; b) Experimental.

Na Figura 5.38 encontram-se representadas em regime permanente e obtidas por simulação e em laboratório as evoluções temporais das tensões u_{o1} , u_{o2} e correntes i_{o1} , i_{o2} sobrepostas na saída dos retificadores (conforme a Figura 5.18). Verifica-se uma defasagem entre as tensões de 30° entre elas bem como um alisamento das correntes resultante do uso das bobinas interfásicas e a contribuição da corrente de 0,5A na saída de cada retificador trifásico.

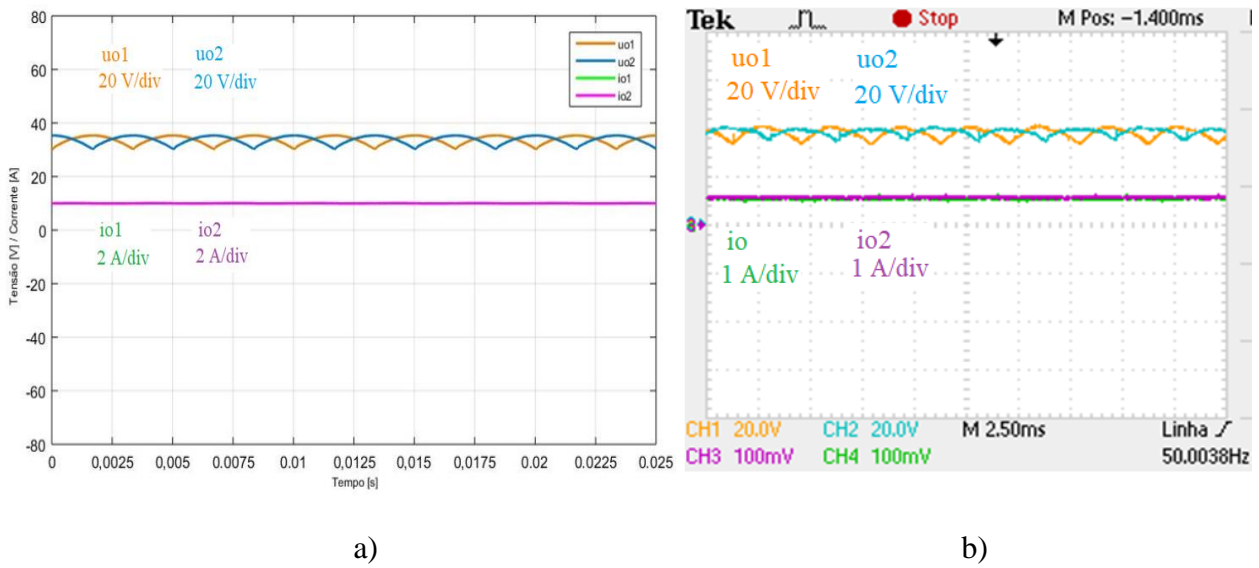


Figura 5. 38 – Tensões (u_{o1} , u_{o2}) e correntes (i_{o1} , i_{o2}) de saída dos retificadores obtidas por: a) Simulação; b) Experimental.

Na Figura 5.39 encontra-se representada a evolução temporal da tensão u_o e a corrente i_o em regime permanente da carga. Na análise da Figura 5.39 é possível observar-se a contribuição da corrente dos dois retificadores trifásicos resultando numa corrente total de 1A entregue à carga.

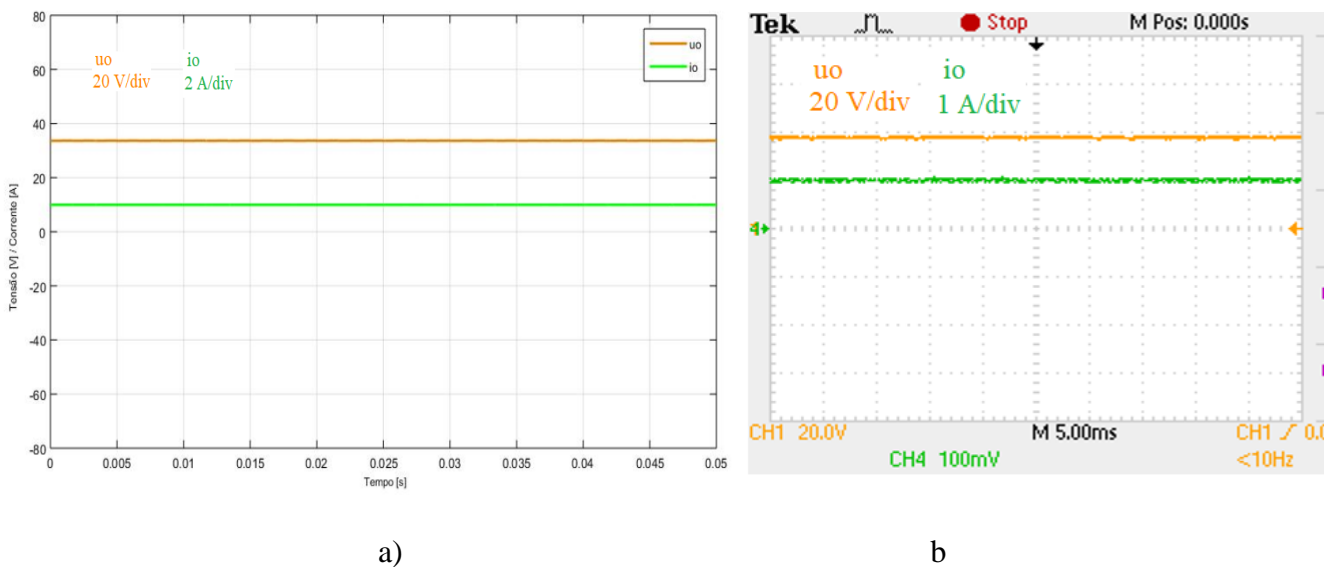


Figura 5. 39 – Tensão u_o e corrente i_o na carga obtidas por: a) Simulação; b) Experimental.

Na Figura 5.40 encontra-se representado o espectro de frequência da tensão simples u_a à entrada do retificador 1 (Figura 5.18) obtido a partir dos dados obtidos com o analisador de qualidade de energia elétrica TOPAS 1000. É possível observar o valor eficaz da harmónica da frequência fundamental de 50Hz e as restantes harmónicas ímpares de amplitudes muito reduzidas ou praticamente nulas. A utilização da equação (3.13) permite o cálculo da THD na ordem dos 1,58%.

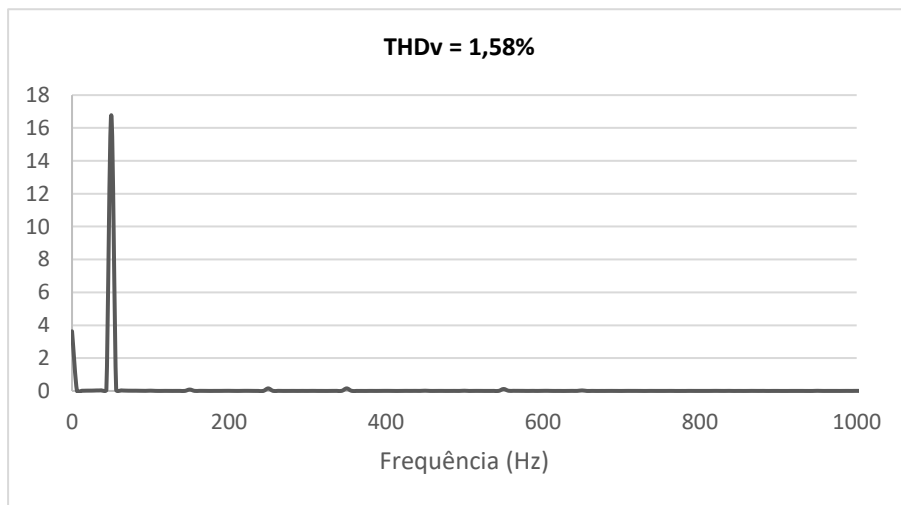


Figura 5. 40 – Espectro de tensão simples u_a de entrada do retificador trifásico 1 (Ensaio experimental).

Na Figura 5.41 encontra-se representado o espectro de frequência da tensão simples u_a na entrada do retificador trifásico 1 obtido em simulação numérica através do bloco analisador FFT do *powergui*. Observa-se a amplitude da frequência fundamental em valores percentuais até ao limite da 20ª harmónica (1000Hz). É ainda possível obter o valor da THD na ordem de 0,33%.

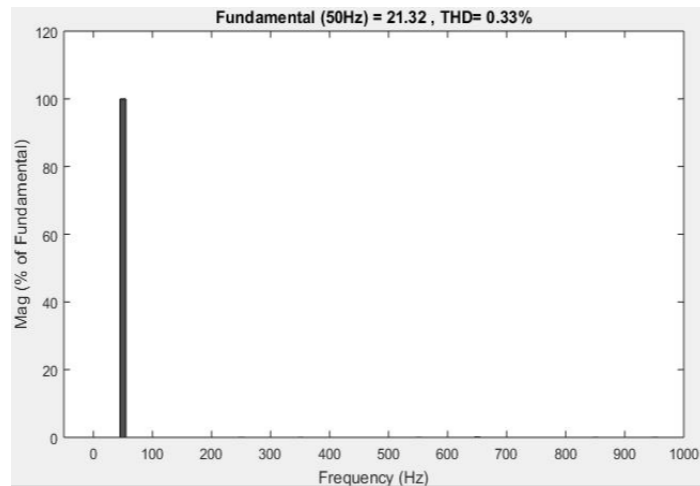


Figura 5. 41 – Espectro de tensão simples u_a na entrada do retificador trifásico 1 (Ensaio de simulação).

Na Figura 5.42 encontra-se representado o espectro de frequência da tensão u_{o1} à saída do retificador trifásico 1 (Figura 5.18) obtido em laboratório a partir do analisador de qualidade de energia elétrica TOPAS 1000. É possível observar a amplitude do valor médio (componente contínua) da tensão u_{o1} na ordem dos 40V (equações (4.4) e (4.5) obtidas no Capítulo 4). Observa-se igualmente no espectro a existência de harmônicas de ordem par com a componente fundamental de 300Hz.

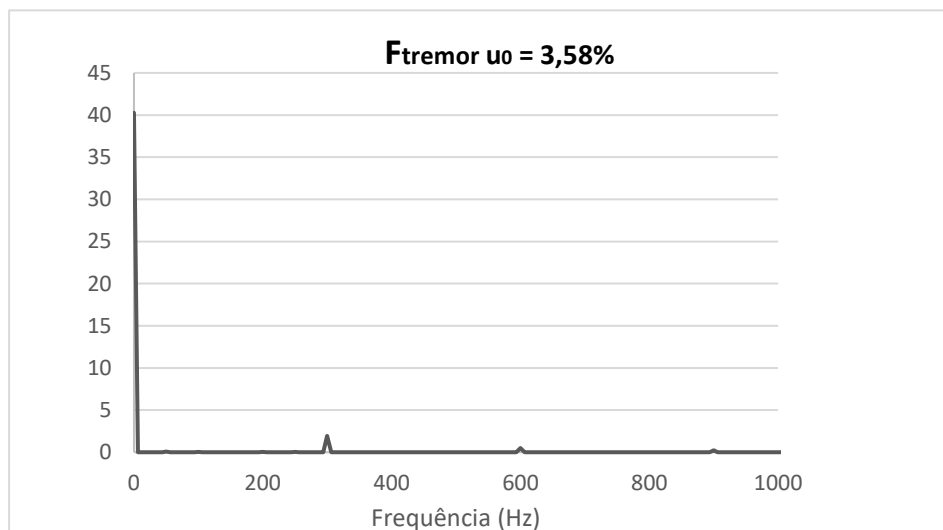


Figura 5. 42 – Espectro de tensão u_{o1} na saída do retificador trifásico 1 (Ensaio experimental).

Na Figura 5.43 encontra-se representado o espectro de frequência da tensão u_{o1} à saída do retificador trifásico 1 (Figura 5.18) obtido em simulação numérica através do bloco analisador FFT do *powergui*. Observa-se em porcentagem da componente contínua

(valor médio) a componente fundamental (300Hz) e suas múltiplas. É possível também observar-se um aumento percentual da *THD* na sua saída. Neste processo de cálculo com a equação (3.13) está excluído a componente contínua DC.

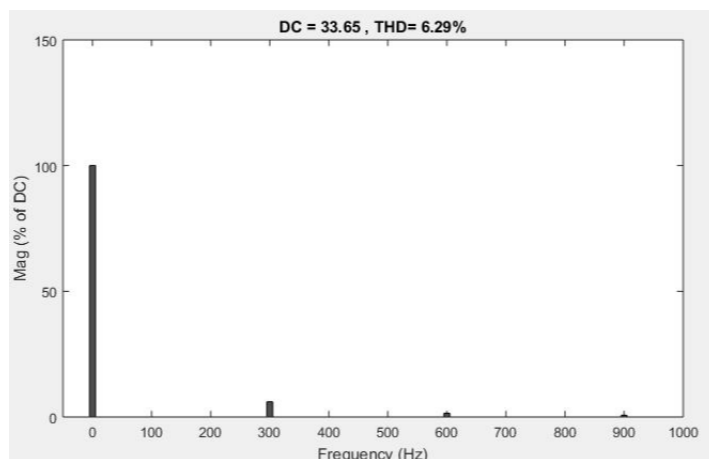


Figura 5. 43 – Espectro de tensão u_{o1} na saída do retificador trifásico 1 (Ensaio de simulação).

Na Figura 5.44 encontra-se representado o espectro de frequência da corrente i_a de entrada do retificador trifásico em ponte 1 obtido a partir dos dados obtidos com o analisador de qualidade de energia elétrica TOPAS 1000. É possível observar a amplitude da frequência fundamental de 50Hz e as restantes harmônicas ímpares de amplitudes reduzidas bem como o valor *THD* da corrente de 28,37% que corresponde a uma *TDD* de 27,29% o que representa de acordo a IEEE-519 (Tabela 3.2) um valor relativamente preocupante sendo que excede o limite estabelecido pela mesma norma que é de 5% vezes 1,5 para medição semanal o que corresponde a uma *TDD* de 7,5%. A norma IEEE 519 na página 7 permite que: “*Weekly 99th percentile short time (10 min) harmonic currents should be less than 1,5 times the value given in Table 3.2*”.

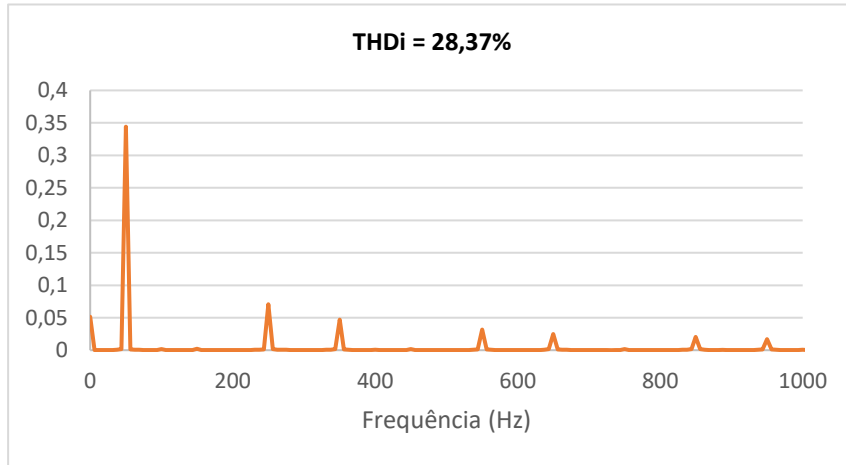


Figura 5. 44 – Espectro de corrente i_a de entrada do retificador trifásico 1 (Ensaio experimental).

Na Figura 5.45 encontra-se representado o espectro da corrente i_a à entrada do retificador trifásico em ponte 1 obtido através do analisador FFT do *powergui* onde se observa a amplitude harmónica da frequência fundamental de 50Hz e as suas múltiplas e ímpares que vai reduzindo de amplitude harmónica com o aumento da frequência. Verifica-se ainda a *THD* da corrente de 30,39 % correspondendo a uma *TDD* de 29,07% o que representa de acordo a IEEE-519 (Tabela 3.2) um valor preocupante sendo que excede o limite estabelecido pela mesma norma que é 5% vezes 1,5 para medição semanal, correspondendo a uma *TDD* de 7,5%. A norma IEEE 519 na página 7 permite que: “*Weekly 99th percentile short time (10 min) harmonic currents should be less than 1,5 times the value given in Table 3.2*”.

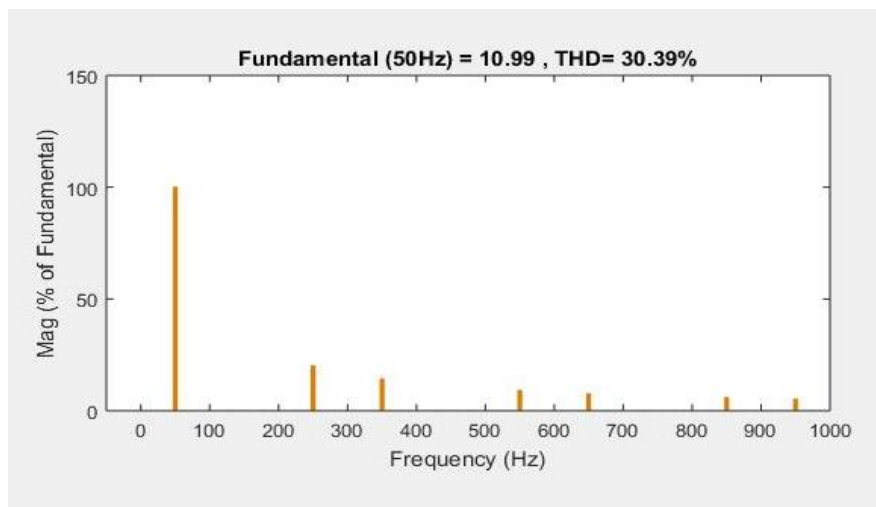


Figura 5. 45 – Espectro da corrente i_a de entrada do retificador trifásico 1 (Ensaio de simulação).

Na Figura 5.46 encontra-se representado o espectro de frequência das correntes i_a e i_b à entrada dos retificadores trifásicos em ponte 1 e 2 obtido a partir dos dados obtidos com o analisador de qualidade de energia elétrica TOPAS 1000. É possível observar a amplitude harmônica da frequência fundamental de 50Hz e as restantes harmônicas ímpares de amplitudes reduzidas. Para uma THD da corrente na ordem dos 13,50% que corresponde a uma TDD de 13,37% (calculado com a equação (3.18)) valor relativamente preocupante de acordo a IEEE-519 (Tabela 3.2) sendo que excede o limite estabelecido pela mesma norma que é 5% vezes 1,5 para medição semanal, correspondendo a uma TDD de 7,5%. A norma IEEE 519 na página 7 permite que: “Weekly 99th percentile short time (10 min) harmonic currents should be less than 1,5 times the value given in Table 3.2”.

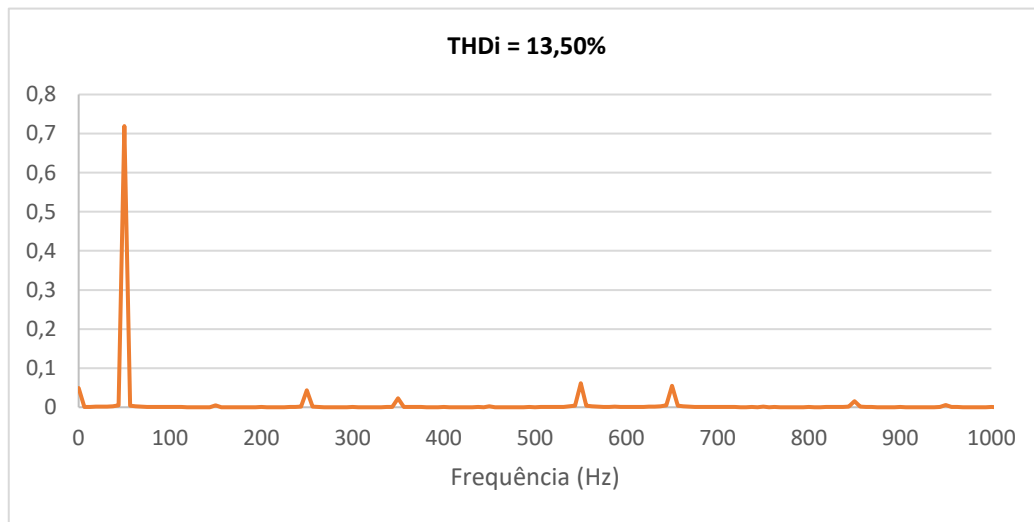


Figura 5. 46 – Espectros de correntes i_a e i_b de entrada dos retificadores 1e 2 (Ensaio experimental).

Na Figura 5.47 encontra-se representado o espectro de frequência da corrente i_{pa} de entrada do primário do transformador com ligação em estrela, obtido a partir dos dados obtidos com o analisador de qualidade de energia elétrica TOPAS 1000 onde observar-se a componente contínua e a amplitude harmônica da frequência fundamental de 50Hz e as restantes harmônicas ímpares. A THD tem um valor de 11,19%, que corresponde a uma TDD de 11,12% (calculado matematicamente) valor relativamente preocupante de acordo a IEEE-519 (Tabela 3.2) sendo que excede o limite estabelecido pela mesma norma que é 5% vezes 1,5 para medição semanal, correspondendo a uma TDD de 7,5% conforme descrito anteriormente.

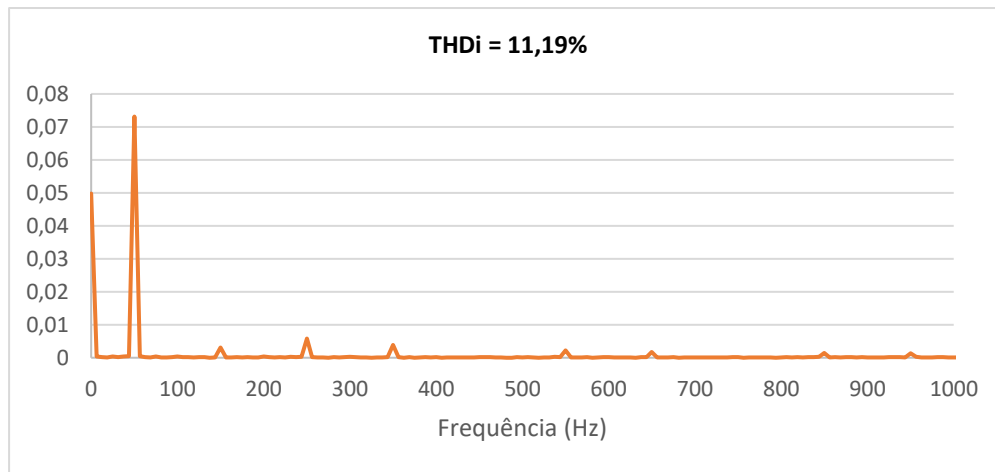


Figura 5. 47 – Espectros de corrente i_{pa} de entrada do primário do transformador com ligação em estrela (Ensaio experimental).

Na Figura 5.48 encontra-se representado o espectro de frequência da corrente à entrada do transformador com ligação em estrela, obtido através do analisador FFT do *powergui* onde se observa a amplitude harmónica da frequência fundamental de 50Hz e as harmónicas ímpares de amplitude reduzidas. Verifica-se a *THD* da corrente com um valor de 2,77% correspondendo a uma *TDD* de 2,76% (calculado matematicamente) que não representa um valor preocupante de acordo a IEEE-519 (Tabela 3.2) sendo que não excede o limite estabelecido pela mesma norma que é 5% vezes 1,5 para medição semanal, correspondendo a uma *TDD* de 7,5% conforme descrito anteriormente.

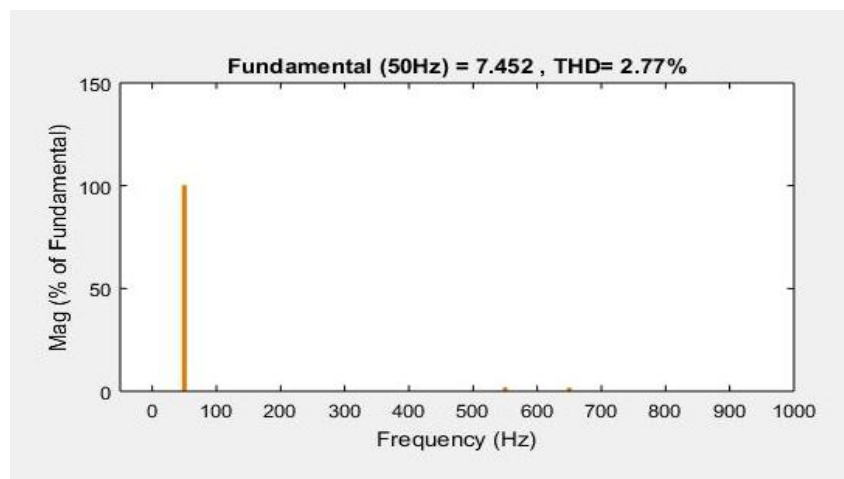


Figura 5. 48– Espectros de corrente i_{pa} de entrada do primário do transformador com ligação em estrela (Ensaio de simulação).

Com os resultados realizados quer com os parâmetros reais como com os resultados dos ensaios experimentais e de sua validação verificasse um aproximação relativa nos resultados obtidos sendo que para a implementação experimental em laboratório houve a necessidade ser realizada a redução dos níveis das grandezas elétricas bem como para os variados equipamentos que poderiam ser encontrados numa SST real tal como a carga bem como o modelo da linha (terceiro carril) para alimentação elétrica da carga.

Na Tabela 5.7 apresenta-se de forma comparativa os resultados obtidos com a simulação numérica com os parâmetros do metro, simulação numérica com os parâmetros do equipamento existente em laboratório e respectivos ensaios laboratoriais. São apresentados em percentagem os valores da *THD*, *TDD* e o cumprimento ou não da Norma IEEE 519.

Tabela 5. 7 – Comparação de resultados.

Grandeza	Simulação com parâmetros do Metro: <i>THD/TDD/Norma</i>	Simulação com parâmetros do material em laboratório: <i>THD/TDD/Norma</i>	Ensaio em laboratório <i>THD/TDD/Norma</i>
i_{p1}	7,66/7,63/Não	2,77/2,76/Sim	11,19/11,12/Não
i_{a1}	29,61/28,39/Não	30,39/29,07/Não	28,37/27,29/Não

Capítulo 6

Conclusões

O presente capítulo apresenta as conclusões gerais desta dissertação e suas perspectivas de desenvolvimentos que num futuro possam vir a ser realizadas.

6. CONCLUSÕES

6.1. Conclusões Gerais

Foi feita uma abordagem geral sobre o início do sistema ferroviário em Portugal e em Angola. Verificou-se os anos de entrada de funcionamento das primeiras linhas exploradas bem como os respetivos mapas dos caminhos de ferro (Figura 2.2) onde se encontra o mapa de Angola na altura sob exploração de Portugal. De realçar que até nos dias de hoje as regiões marcadas no respetivo mapa (Luanda) encontram-se em pleno funcionamento após uma reabilitação das mesmas. Foi ainda feita uma caracterização do sistema de alimentação de energia das subestações de tração quer em corrente alternada e em corrente contínua.

Igualmente abordado nesta dissertação a análise do conteúdo harmónico das correntes nas subestações em que foram atingidos os objetivos propostos com o estudo teórico, simulação numérica e validação experimental de um protótipo à escala reduzida de uma subestação de tração. Para a sua realização e concretização foram utilizados transformadores de potência, retificadores trifásicos em ponte não controlados, bobinas interfásicas e um reóstato que serviu como o modelo da carga.

A simulação numérica foi feita com recurso ao software *Matlab/Simulink* utilizando a *Toolbox SimPowerSystem* onde a mesma serviu para comparação e validação dos resultados obtidos experimentais realizados no laboratório.

Com a implementação laboratorial foi possível a visualização em regime dinâmico e permanente da evolução temporal das principais grandezas bem como a obtenção de dados para construção e visualização dos espectros harmónicos das tensões e correntes, quer à entrada dos retificadores dodecafásicos e a sua saída, com recurso ao analisador de qualidade de energia elétrica TOPAS 1000.

Através dos resultados obtidos das simulações numéricas realizadas, verificou-se ainda o espectro da corrente à entrada do primário do transformador com ligação em estrela para o ensaio experimental que apresenta uma *THD* da corrente de 11,19% correspondente a uma *TDD* de 11,12% sendo um valor relativamente elevado quando

comparados aos limites estabelecidos pela norma IEEE 519, sendo que excede o limite estabelecido pela mesma norma que é 5% vezes 1,5 para medição semanal, correspondendo a uma *TDD* de 7,5%.

Relativamente a simulação numérica com os parâmetros do metro, verificou-se uma *THD* harmónica da corrente de 7,66% correspondendo a *TDD* de 7,63% o que não representa de acordo a IEEE 519 um valor preocupante sendo que o limite estabelecido pela norma é de 5% vezes 1,5 para medição semanal, correspondendo a uma *TDD* de 7,5%.

6.2. Desenvolvimentos Futuros

Neste subcapítulo, descrevem-se alguns tópicos que podem ser úteis para trabalhos futuros a serem desenvolvidos tendo como base esta dissertação:

- Aproveitamento do barramento DC das subestações de tração em corrente contínua para carregamento de veículos elétricos;
- Interligação do barramento DC das subestações de tração em corrente contínua com Rede Elétricas Inteligentes (*Smart Grids*);
- Utilização de Transformadores de Estado Sólido (*Solid State Transformer*) para substituição da solução estudada e apresentada neste documento.

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS

- [1] – Guedes, Manuel Vaz, “Introdução a tração elétrica” 1992, 2000.
- [2] – Frey, Sheilah, “Railways Electrification Systems & Engineering”, 2012
- [3] – The railway technical website.
<http://www.railway-technical.com/infrastructure/electric-traction-power.html>
- [4] – Alves, António, “Carris de ferro em Portugal”, 2009.
- [5] – Comboios CP.
<https://www.cp.pt/institucional/pt/empresa>
- [6] – Metropolitano de Lisboa.
<https://www.metrolisboa.pt/institucional/conhecer/historia-do-metro>
- [7] – Arquivo Jornal de Angola.
<http://jornaldeangola.sapo.ao/arquivohistorico>
- [8] – Angolan Railroads news and projects.
<https://www.scmglobe.com/sj-trading-company-angola>
- [9] – Chaves, Miguel “Manual de TVE, ISEL 2018”.
- [10] – Railways Electrification Systems .
<http://www.railway-technical.com/infrastructure/electric-traction-power.html>
- [11] – A.Billot, J.P Massate, J. Mentel, “Design of Pantograph-catenary systems by simulation, French railway”.
- [12] – REFER, “Esquemas Elétricos de Princípio e Encravamentos nas Subestações”, 2013.
- [13] – Pereira, Rui, “Análise ao Sistema de Alimentação de Tração Elétrica”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica, ISEP, 2013.
- [14] – REFER, “Esquemas Elétricos e Encravamentos nas Subestações”, 2013.
- [15] – Chaves, Miguel “Manual de TVE, ISEL, 2018”.
- [16] – REFER, “Energia de Tração para Técnicos de Segurança Sistema de Eletrificação”, 2013.
- [17] – REFER “Energia de Tração para Técnicos de Segurança de Equipamentos de Alta Tensão”, 2013.
- [18] – REFER, “Energia de Tração para Técnicos de Segurança Sistema de Eletrificação”, 2013.
- [19] – Folheto Informativo “Metropolitano de Lisboa”.

- [20] – Gambôa, Paulo, “Acetatos de Qualidade de Energia”, ISEL, 2017.
- [21] – EDP, “Manual da Qualidade de Energia Elétrica”, 2015.
- [22] – Wakileh, George, “Power Systems Harmonics”, 2001.
- [23] – Palma, João “Fundamentos de Eletrónica de Potência”, 2018.
- [24] – Gambôa, Paulo, “Acetatos de Qualidade de Energia”, ISEL, 2018.
- [25] – International Standard, Limits Harmonic Current Emissions, IEC 61000-3-2.
- [26] – IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std 519-2014.
- [27] – Norma Portuguesa, “Características da Tensão Fornecida pelas Redes de Distribuição Pública de Energia Elétrica.
- [28] – Gambôa, Paulo, “Acetatos de Qualidade de Energia”, ISEL, 2018.
- [29] – Palma, João “Fundamentos de Eletrónica de Potência”, 2018.
- [30] – IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std 519-1992.
- [31] – Parâmetros de Subestações de Tração do Metropolitano de Lisboa, 2019
- [32] – Chaves, Miguel; Gambôa, Paulo “Trabalho Prático Laboratorial de Tração e Veículos Elétricos”, ISEL, 2018.

Anexos

ANEXOS

Anexo A - Dados técnicos fornecidos pelo Metropolitano de Lisboa da unidade de tração elétrica ML99

15/12/2019

Metropolitano de Lisboa - ML99



Português
English
Español



Início



Comboios



Rede



Pessoas



Artigos

ML99 - Ficha Técnica

Número de Série: M-601 a M-714
Número de Unidades: 114
Ano de Entrada ao Serviço: 2000/02

Tipo de Tracção: Eléctrica
Natureza do Serviço: Metropolitano
Bitola de Via: 1435 mm

Galeria de Imagens



Galeria (Clicar)

(C) J. Pombo

Características Técnicas

Medidas:

Pesos:
Em Tara (Motora) 29,3 t
Em Tara (Reboque) 18,8 t
Carga Normal Máxima (M) 40,6 t
Carga Normal Máxima (R) 31,2 t

Capacidade (Motora):
Passageiros Sentados 38
Passageiros em Pé (6 Passageiros / m²) 127
Total 165

Dimensões:

Comprimento (Motora) 16.224 mm
Comprimento (Reboque) 16.058 mm
Largura Máxima 2.785 mm
Altura Máxima 3.523 mm
Bitola de Via 1.435 mm

Capacidade (Reboque):
Passageiros Sentados 44
Passageiros em Pé (6 Passageiros / m²) 141
Total 185

Desempenhos (M+M):

Velocidade Máxima 72 km/h
Aceleração Máxima 1,3 m/s²
Desaceleração Média 1,2 m/s²
Desaceleração de Emergência 1,4 m/s²

Desempenhos (M+R+M):

Velocidade Máxima 72 km/h
Aceleração Máxima 1,0 m/s²
Desaceleração Média 1,0 m/s²
Desaceleração de Emergência 1,4 m/s²

Sistema de Tracção:

Ondulador de Tensão com GTO
Motores assíncronos trifásicos com dupla gaiola de esquilo.

Características Eléctricas:

Tensão de Alimentação 750 V cc
Potência Instalada (1 Carruagem) 4 x 175 kW

Frenagem:

De Serviço Electrodinâmico (Reostático ou Recuperação)
De Emergência Pneumática + Electromagnética
De Paragem Electropneumática de Discos
De Estacionamento Tipo Mola, incorporada num cilindro de Freio

Transmissão:

Redutor com dois andares de transmissão
Engrenagens cilíndricas
Veio oco com andares elásticos

Caixa:

Autoportante em aço inoxidável com cabeçotes em aço de alta resistência
Dispositivo anti-encavalamento nas extremidades
Sistema de interligação com passadiço semi-rígido
Fole Exterior e Revestimento interior em Alumínio e GFK
Revestimento interior em Melamínium e resina fenólica
Bancos anti-vandalismo sem apoios no chão
Portas - tipo ladeante, de comando electrónico

Bogie:

Tipo Bimotor
Suspensão Primária Borracha tipo MEGGI
Suspensão Secundária Bolsas Pneumáticas c/ molas de borracha
Relação de Transmissão 1 : 7,45



Número Total de Carruagens 114

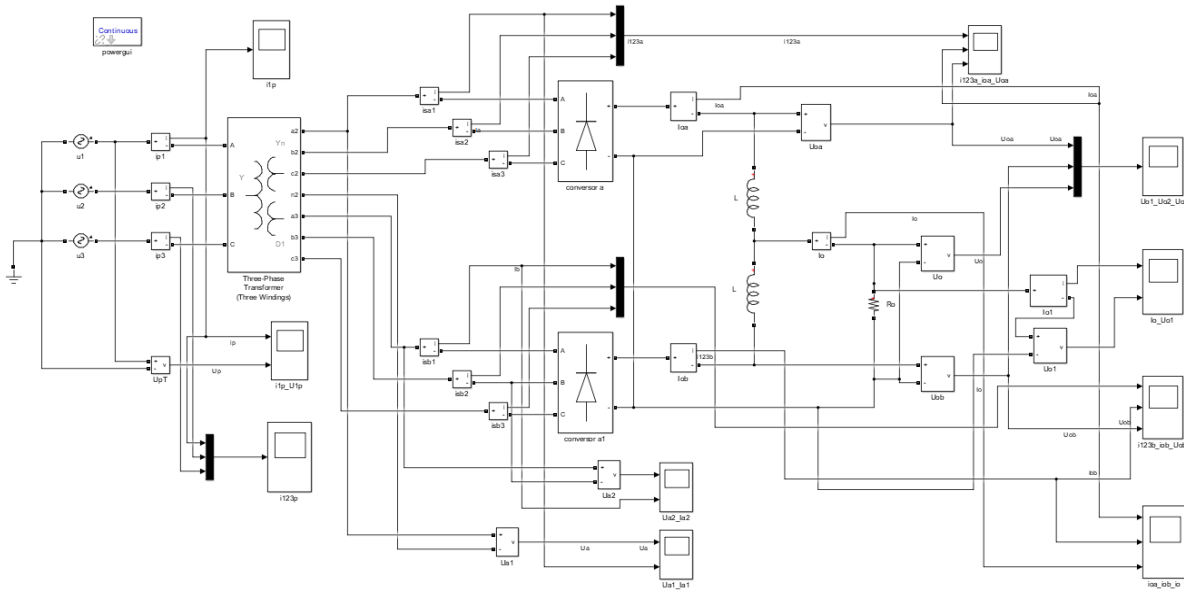
Fabricante Sorefame / Bombardier

https://www.trainlogistic.com/pt/Comboios/Gabinete/fich_ml99.htm

1/2

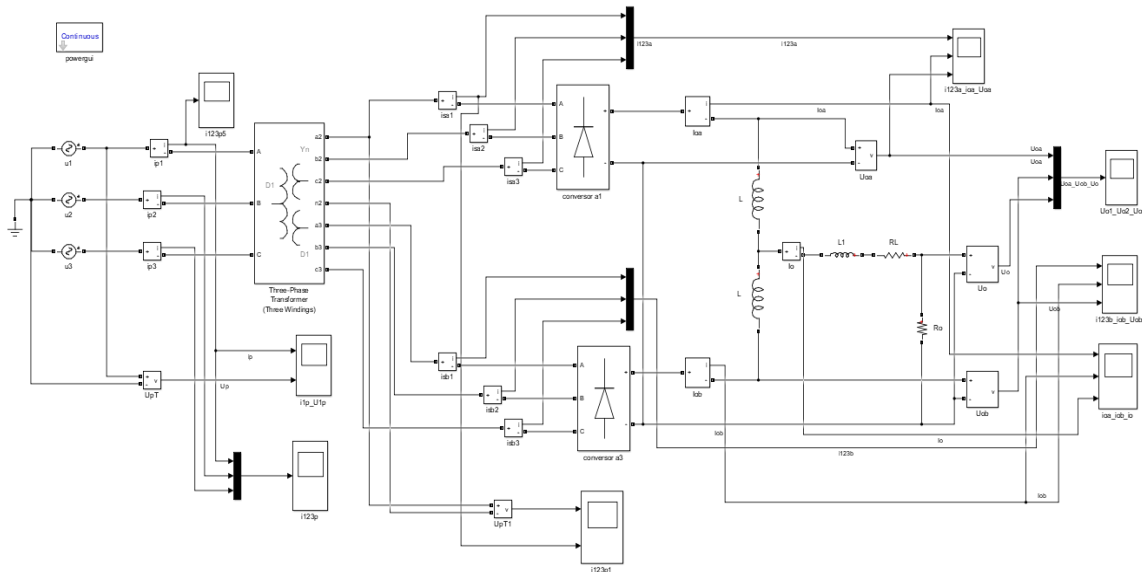
Anexo B – Simulação Numérica para Validação da Implementação Laboratorial

A Figura seguinte representa o modelo global construído em *Matlab/Simulink* para a simulação numérica com os parâmetros do equipamento existente no Laboratório de Eletrônica Industrial (transformador de potência, retificadores trifásicos em ponte, bobina interfásica e a carga R_o). Os resultados obtidos com este modelo em simulação permitem a comparação com os resultados obtidos com o protótipo montado laboratorialmente.



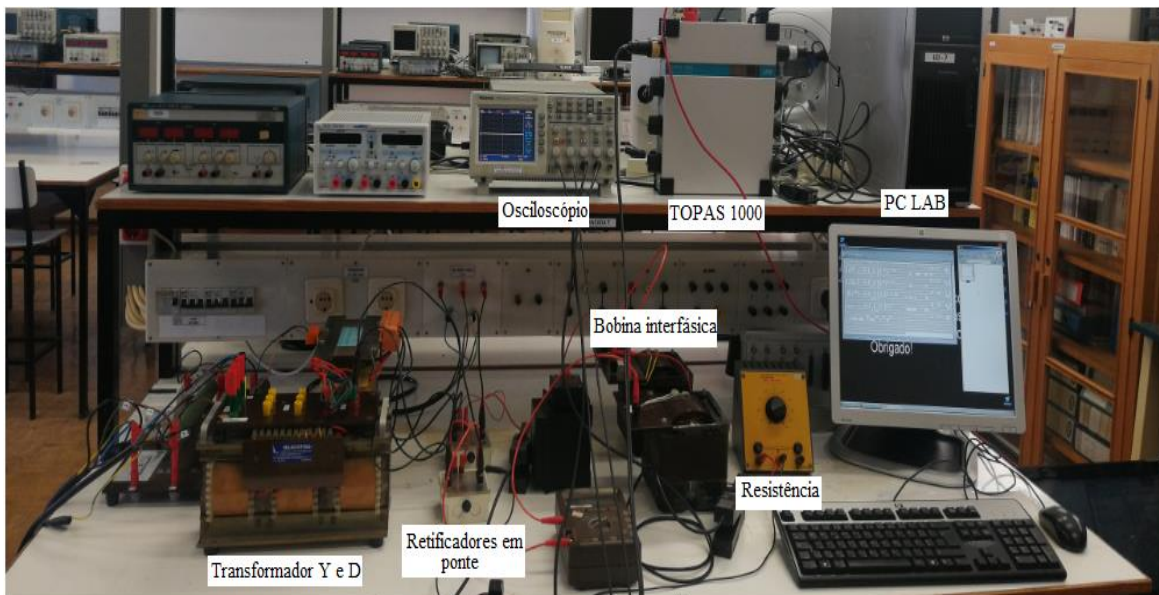
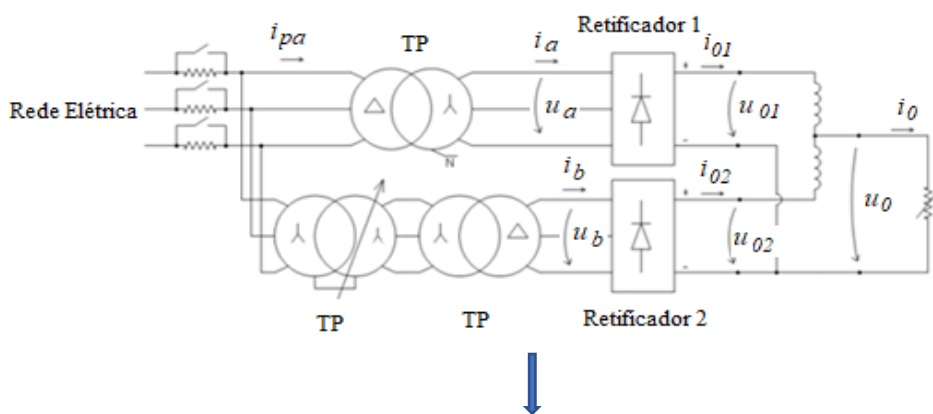
Anexo C – Simulação Numérica para Ensaio com os Parâmetros Reais do Metro

A Figura seguinte representa o modelo global utilizado para a simulação numérica com os parâmetros reais existentes no metropolitano de Lisboa. Pode verificar-se uma ligeira diferença na sua representação sendo que este modelo global inclui a linha de transmissão (terceiro carril) e a resistência equivalente da carga R_o .



Anexo D – Montagem do Protótipo em Laboratório

As duas figuras seguintes representam respectivamente o esquema elétrico de ligações e em correspondência a fotografia da montagem realizada em laboratório. Apresenta-se a identificação do transformador de potência, retificadores trifásicos em ponte, bobina interfásica, carga R_o , osciloscópio digital e o analisador de qualidade de energia elétrica TOPAS 1000.



Anexo E – Cálculo da Resistência da Carga R_o

Para o dimensionamento da resistência equivalente da carga R_o foi necessário a utilização dos dados técnicos da carruagem ML 99 (Anexo A). Esta resistência equivalente R_o representa de forma aproximada toda dinâmica e impedância de entrada do sistema de alimentação da locomotiva pelo terceiro carril (Figura 2.22). A partir do valor da potência instalada para a carruagem do metro e equações 4.4, 4.5, 4.8, foi realizado o seu cálculo matemático.

Potencia Instalada da carga (1 carruagem)
$4 \times 175\text{kW}$
$U_c = 585 \text{ V}$
$U_s = \frac{U_c}{\sqrt{3}} = \frac{585}{\sqrt{3}} = 337,75 \text{ V}$
$U_{oav_a} = U_{oav_b} = \frac{3\sqrt{6} \times U_s}{\pi} = \frac{3\sqrt{6} \times 337,75}{\pi} = 790,03 \text{ V}$
$U_{oav} = \frac{U_{oav_a} + U_{oav_b}}{2} = \frac{790,03 + 790,03}{2} = 790,03 \text{ V}$
$I_{oav} = \frac{P}{U_{oav_a}} = \frac{4 \times 175 \times 10^3}{790,03} = 886,04 \text{ A}$
Resistência da Carga (R_o)
$R_o = \frac{U_{oav}}{I_{oav}} = \frac{790}{886,04} = 0,891 \Omega = 891 \text{ m}\Omega$

Anexo F – Cálculos da THD, TDD e Ftremor

O analisador de Qualidade de Energia Elétrica TOPAS 1000 tem um *software* próprio que permite a sua parametrização e acesso aos dados. Esses dados podem ser disponibilizados em ficheiros do tipo Excel, permitindo a reconstrução das evoluções temporais (tensões e correntes) ou identificação das frequências e as correspondentes amplitudes (ou valores eficazes) para obtenção dos espectros (tensões e correntes).

Com os dados obtidos em Excel, na tabela seguinte apresenta-se um exemplo de cálculo para a construção do espectro da tensão (obtido a partir do Analisador de Qualidade de Energia Elétrica) e respetivo cálculo do Fator de Tremor (*Ftremor*). Este exemplo está associado à Figura 5.42.

Espectro da tensão e cálculo do Fator de Tremor (<i>Ftremor</i>)	
Frequência (Hz)	Tensão de fase (V)
0	40,265
300	1,952
600	0,491
900	0,215

$$U_{ORMS} = \sqrt{U_{oav}^2 + \frac{\Sigma U_L^2}{2}} = \sqrt{(40,265)^2 + \frac{1,952^2 + 0,491^2 + 0,215^2}{2}} = 40,29 \text{ V}$$

$$F_{Tremoru_0} = \sqrt{\frac{U_{ORMS}^2 - U_{oav}^2}{U_{oav}^2}} = \sqrt{\frac{40,290^2}{40,265^2} - 1} \cong 4\%$$

Com os dados obtidos em Excel, na tabela seguinte apresenta-se um exemplo de construção do espectro da corrente i_a (entrada do retificador trifásico em ponte não controlado) e respetivo cálculo da THD_i . Este exemplo está associado à Figura 5.44.

Espectro de corrente i_a de entrada do retificador trifásico e cálculo da THD_i	
Frequência (Hz)	Corrente harmónica (A)
50	0,344
250	0,071
350	0,047
550	0,032
650	0,025
850	0,021
950	0,017
$THD_i = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum I_h^2} = \frac{1}{0,344} \sqrt{0,071^2 + 0,047^2 + 0,032^2 + 0,025^2 + 0,021^2 + 0,017^2}$ $= 28,37\%$ $TDD = \sqrt{\frac{THD_i^2}{1 + THD_i^2}} = \sqrt{\frac{0,2837^2}{1 + 0,2837^2}} = 27,29\%$	

