

**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

[Nome do Aluno]

[Título]

PhD Thesis  
Doctoral Program in Electronics and Computers  
Engineering

Work carried out under the guidance of the  
**Professor Doctor [nome]**

[Month] de [year]



## **DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS**

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositórioUM da Universidade do Minho.

### **Licença concedida aos utilizadores deste trabalho**



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações  
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



# Acknowledgment





## **STATEMENT OF INTEGRITY**

I hereby declare having conducted this academic work with integrity. I confirm that I have not used plagiarism or any form of undue use of information or falsification of results along the process leading to its elaboration.

I further declare that I have fully acknowledged the Code of Ethical Conduct of the University of Minho.

# Resumo

Fazer um resumo em pt-pt do trabalho, fazendo um pequeno enquadramento e realçando o trabalho desenvolvido

**Palavras-Chave:** Palavras chaves relacionadas com o tema de investigação. As palavras chave devem ser introduzidas por ordem alfabética. 3 a 5 palavras chave

# Abstract

traduzir

**Keywords:** traduzir



# ÍNDICE

Resumo .....	iii
Abstract.....	ix
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas .....	xv
Acrónimos e Siglas .....	xvii
Nomenclatura.....	xviii
<b>Capítulo 1 Introdução.....</b>	<b>19</b>
1.1    Enquadramento .....	19
1.2    Qualidade da Energia Elétrica nos Sistemas Elétricos Ferroviários .....	19
1.2.1 Desequilíbrios .....	20
1.2.2 Harmónicos .....	20
1.2.3 Fator de Potência.....	20
1.2.4 Arcos Elétricos .....	20
1.3    Organização e Estrutura do Relatório .....	21
<b>Capítulo 2 Tecnologias de [Estado da Arte] .....</b>	<b>22</b>
2.1    Introdução .....	22
2.2    Evolução dos Sistemas de Alimentação Ferroviários.....	22
2.3    Conclusões .....	23
<b>Capítulo 3 Conversores de Eletrónica de Potência e Técnicas de Controlo.....</b>	<b>24</b>
3.1    Introdução .....	24
3.2    Condicionadores Ativos para Sistemas Ferroviários.....	24
3.2.1 Conversor de Eletrónica de Potência CC-CA.....	24
3.3    Conversores de Eletrónica de Potência para Interface de Sistemas de Energia Renovável e Armazenamento de Energia .....	24
3.4    Técnicas e Algoritmos de Controlo.....	25
3.4.1 Teorias de Potência .....	25
3.4.2 Técnicas de Modulação para Conversores VSI .....	25
3.4.2.1 Modulação Bipolar .....	25
3.4.2.2 Modulação Unipolar .....	25
3.5    Conclusões .....	25
<b>Capítulo 4 Simulações Computacionais.....</b>	<b>26</b>
4.1    Introdução .....	26
4.2    Condicionador Ativo Série.....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>
4.3    Conclusões .....	26
<b>Capítulo 5 Desenvolvimento do Protótipo Experimental.....</b>	<b>29</b>
5.1    Introdução .....	29
5.2    Hardware de Controlo .....	29
5.3    Hardware de potência.....	29
5.4    Conclusões .....	30
<b>Capítulo 6 Resultados Experimentais Obtidos com o UPQC .....</b>	<b>31</b>
6.1    Introdução .....	31
6.2    Resultados Experimentais do Condicionador Ativo Paralelo.....	31
6.3    Conclusões .....	32
<b>Capítulo 7 Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro .....</b>	<b>33</b>
7.1    Conclusões .....	33

## Índice

7.2 Sugestões para Trabalho Futuro .....	34
Referências.....	37

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Exemplo da distorção típica das correntes e das tensões na rede elétrica. ....	19
Figura 2.5 – Espectro harmônico no sistema elétrico ferroviário com transformador de potência V/V: (a) das correntes da rede elétrica; (b) das correntes da catenária. ....	22
Figura 4.1 – Amortecimento de ressonância com condensador dividido para conversor fonte de tensão. .....	<b>Erro! Marcador não definido.</b>



## Lista de Tabelas

Tabela 1.1- Parâmetros do modelo elétrico de uma locomotiva e da impedância de linha da catenária (baseado em [5], [6]).....	20
---	----



## Acrónimos e Siglas

Acrónimo/Sigla	Significado
----------------	-------------

ZCD	<i>Zero-Crossing Detector</i>
-----	-------------------------------

## Nomenclatura

Símbolo	Significado	Unidade
$f$	Frequênciā	Hz
$f_c$	Frequênciā de comutação	Hz
$f_s$	Frequênciā de amostragem	Hz

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

[introdução ao problema]

O transporte ferroviário é reconhecido como um dos principais catalisadores para o desenvolvimento económico de qualquer país, apresentando-se como o transporte terrestre mais seguro e económico [1]–[3].

### 1.2 Qualidade da Energia Elétrica nos Sistemas Elétricos Ferroviários

Devido à proliferação de cargas não-lineares, a QEE na rede elétrica é uma das maiores preocupações no presente século..... Na Figura 2.1 encontram-se expostos alguns problemas de QEE existentes na rede elétrica, evidenciando o sistema elétrico ferroviário.

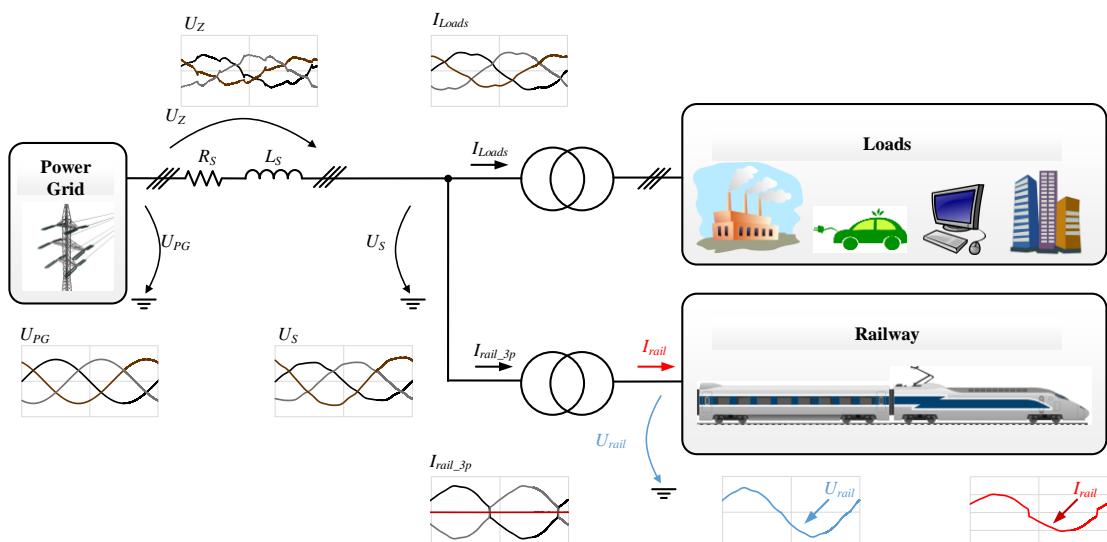


Figura 2.1 – Exemplo da distorção típica das correntes e das tensões na rede elétrica.

Não obstante, na Tabela 2.1 encontram-se expostos os valores das variáveis representadas no modelo da Figura 1.2, bem como o valor da resistência,  $R_{s\_Cat}$ , e da reactância,  $L_{s\_Cat}$ , da impedância de linha da catenária em função da distância.

Tabela 2.1- Parâmetros do modelo elétrico de uma locomotiva e da impedância de linha da catenária (baseado em [5], [6]).

VARIÁVEL	VALOR	GRANDEZA
$P_{Train}$	4 800	W
$R_L$	0,8	$\Omega$
$R_u$	1	$\Omega$
$L_u$	2	mH
$R_{s\_Cat}$	0,2	$\Omega/\text{km}$
$L_{s\_Cat}$	0,7	$\Omega/\text{km}$

Para a impedância de linha, e com base na equação (2.1), fora possível determinar os valores para a impedância de linha a usar nas simulações computacionais

$$L_s = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (2.1)$$

### 1.2.1 Desequilíbrios

O desequilíbrio do sistema é a questão mais problemática do sistema elétrico ferroviário.

### 1.2.2 Harmónicos

O conteúdo harmônico é o segundo maior problema de QEE das ferrovias. A locomotiva

### 1.2.3 Fator de Potência

Um valor unitário do fator de potência indica uma potência reativa baixa. Por sua vez, a

### 1.2.4 Arcos Elétricos

Ao longo das ferrovias, a altura da catenária varia devido às diferentes pressões exercidas

## 1.3 Organização e Estrutura do Relatório

Esta Tese encontra-se dividida em sete capítulos, cada um tratando de um determinado

The screenshot shows a Microsoft Word document titled "Template\_Barros.docx". The ribbon at the top has tabs for FICHEIRO, BASE, INSERIR, ESTRUTURA, ESQUEMA DE PÁGINA, REFERÊNCIAS, MAILINGS, REVER, VER, GRAMMARLY, and PDFelement. The "ESTRUTURA" tab is active. The main content area contains the following text:

**Capítulo 1 - Introdução**

Esta Tese encontra-se dividida em sete capítulos, cada um tratando de um determinado

The "Estilos" ribbon tab is selected, showing a list of styles on the right side. The "Normal" style is highlighted with a red circle. Another red circle highlights the "Formato" button in the ribbon.

# Capítulo 2

## Tecnologias de ... [Estado da Arte]

### 2.1 Introdução

A locomoção é um bem essencial para o desenvolvimento de qualquer nação. De facto, a

### 2.2 Evolução dos Sistemas de Alimentação Ferroviários

As locomotivas elétricas de alta velocidade e de longa distância, são usualmente Sistemas de Alimentação Ferroviários Convencionais

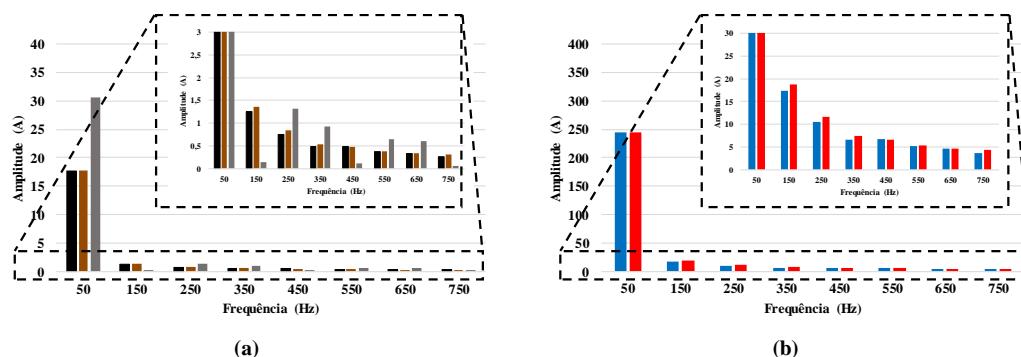


Figura 2.1 – Espectro harmónico no sistema elétrico ferroviário com transformador de potência V/V: (a) das correntes da rede elétrica; (b) das correntes da catenária.

## 2.3 Conclusões

Neste capítulo foram referidos os problemas de QEE provocados pelas locomotivas elétricas, sendo esmiuçado o modelo elétrico equivalente de uma locomotiva e identificado a origem dos diferentes problemas.

# Capítulo 3

## Conversores de Eletrónica de Potência e Técnicas de Controlo

### 3.1 Introdução

A eletrónica de potência é uma área de investigação em constante crescimento. Esta,

### 3.2 Condicionadores Ativos para Sistemas Ferroviários

A crescente evolução tecnológica e aplicações existente, incentiva a investigação de soluções energeticamente mais eficientes. Nesse sentido, os conversores de eletrónica de potência tem vindo a ganhar popularidade devido à sua versatilidade e funcionalidades.

#### 3.2.1 Conversor de Eletrónica de Potência CC-CA

Os conversores de eletrónica de potência do tipo CC-CA, na literatura vulgarmente designados por inversores, apresentam-se como uma das topologias em constante investigação.

### 3.3 Conversores de Eletrónica de Potência para Interface de Sistemas de Energia Renovável e Armazenamento de Energia

## 3.4 Técnicas e Algoritmos de Controlo

### 3.4.1 Teorias de Potência

### 3.4.2 Técnicas de Modulação para Conversores VSI

#### 3.4.2.1 Modulação Bipolar

#### 3.4.2.2 Modulação Unipolar

## 3.5 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas

# Capítulo 4

## Simulações Computacionais

### 4.1 Introdução

Neste capítulo é descrito o

### 4.2 asdasd

O condicionador ativo série

### 4.3 Conclusões

Neste capítulo foi descrita a conceção e desenvolvimento dos controladores utilizados para efetuar o controlo dos conversores que constituem o





# Capítulo 5

## Desenvolvimento do Protótipo Experimental

### 5.1 Introdução

### 5.2 Hardware de Controlo

### 5.3 Hardware de potência

## 5.4 Conclusões

Neste capítulo foi descrita a implementação

# Capítulo 6

## Resultados Experimentais

### 6.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados aos diferentes conversores, bem como aos sistemas de controlo que integram o

### 6.2 Resultados Experimentais do Sistema

Os resultados experimentais obtidos com o

### 6.3 Conclusões

Os ensaios realizados com o protótipo do.

# Capítulo 7

## Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro

### 7.1 Conclusões

Conclusões do trabalho

## 7.2 Sugestões para Trabalho Futuro

Sugestões....





## Referências

- [1] E. P. De La Fuente, S. K. Mazumder, and I. G. Franco, “Railway Electrical Smart Grids: An introduction to next-generation railway power systems and their operation.,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 2, no. 3, pp. 49–55, 2014.
- [2] A. P. Roelof-Jan Molemaker, *The Economic Footprint of the Railway Transport in Europe*. CER, 2014.
- [3] X. P. U. M. R. S. M. B. J. S. C. C. H. S. L. D. N. F. C. H. N. Mazzino, *Rail 2050 Vision: Rail- The Backbone of Europe’s Mobility*. ERRAC, 2017.
- [4] R. Targosz and D. Chapman, “Application note-cost of poor power quality,” *Leonardo Energy*, 2012.
- [5] A. Luo, C. Wu, J. Shen, Z. Shuai, and F. Ma, “Railway static power conditioners for high-speed train traction power supply systems using three-phase V/V transformers,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 10, pp. 2844–2856, 2011.
- [6] I. Krastev, P. Tricoli, S. Hillmansen, and M. Chen, “Future of electric railways: advanced electrification systems with static converters for ac railways,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 4, no. 3, pp. 6–14, 2016.
- [7] K.-W. Lao, M.-C. Wong, N. Dai, C.-S. Lam, L. Wang, and C.-K. Wong, “Analysis of the Effects of Operation Voltage Range in Flexible DC Control on Railway HPQC Compensation Capability in High-Speed Co-phase Railway Power,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 2, pp. 1760–1774, 2018.
- [8] M. Tanta, V. Monteiro, T. J. Sousa, A. P. Martins, A. S. Carvalho, and J. L. Afonso, “Power quality phenomena in electrified railways: Conventional and new trends in power quality improvement toward public power systems,” in *Young Engineers Forum (YEF-ECE), 2018 International*, 2018, pp. 25–30.
- [9] K.-W. Lao, M.-C. Wong, and N. Dai, *Co-phase Traction Power Supply with Railway Hybrid Power Quality Conditioner*. Springer, 2019.
- [10] S. M. M. Gazafrodi, A. T. Langerudy, E. F. Fuchs, and K. Al-Haddad, “Power quality issues in railway electrification: A comprehensive perspective,” *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 3081–3090, 2015.
- [11] K. Lee, “Advances in the application of power electronics to railway traction,” in *Power Electronics Systems and Applications (PESA), 2015 6th International Conference on*, 2015, pp. 1–4.
- [12] Q. Xu, F. Ma, Z. He, Y. Chen, J. M. Guerrero, A. Luo, Y. Li, and Y. Yue, “Analysis and comparison of modular railway power conditioner for high-speed railway traction system,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 8, pp. 6031–6048, 2017.
- [13] F. Ma, Q. Xu, Z. He, C. Tu, Z. Shuai, A. Luo, and Y. Li, “A railway traction power conditioner using modular multilevel converter and its control strategy for high-speed railway system,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 2, no. 1, pp. 96–109, 2016.

- [14] D. Serrano-Jiménez, L. Abrahamsson, S. Castaño-Solis, and J. Sanz-Feito, “Electrical railway power supply systems: Current situation and future trends,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 92, pp. 181–192, 2017.
- [15] J. Pinto, M. Tanta, V. D. F. Monteiro, L. A. Barros, and J. L. Afonso, “Active power conditioner based on a voltage source converter for harmonics and negative sequence components compensation in electrified railway systems,” in *Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018*, 2018.
- [16] I. Perin, P. F. Nussey, U. M. Cella, T. V. Tran, and G. R. Walker, “Application of power electronics in improving power quality and supply efficiency of AC traction networks,” in *Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2015 IEEE 11th International Conference on*, 2015, pp. 1086–1094.
- [17] Y. Jiang, J. Liu, W. Tian, M. Shahidehpour, and M. Krishnamurthy, “Energy harvesting for the electrification of railway stations: Getting a charge from the regenerative braking of trains.,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 2, no. 3, pp. 39–48, 2014.
- [18] J. H. Kim, B.-S. Lee, J.-H. Lee, S.-H. Lee, C.-B. Park, S.-M. Jung, S.-G. Lee, K.-P. Yi, and J. Baek, “Development of 1-MW inductive power transfer system for a high-speed train,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 10, pp. 6242–6250, 2015.
- [19] A. Reatti, F. Corti, and L. Pugi, “Wireless Power Transfer for Static Railway Applications,” in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*, 2018, pp. 1–6.
- [20] H.-W. Lee, K.-C. Kim, and J. Lee, “Review of maglev train technologies,” *IEEE transactions on magnetics*, vol. 42, no. 7, pp. 1917–1925, 2006.
- [21] E. H. Watanabe, M. Aredes, J. Afonso, J. Pinto, L. Monteiro, and H. Akagi, “Instantaneous p-q power theory for control of compensators in micro-grids,” in *2010 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, 2010, pp. 17–26.