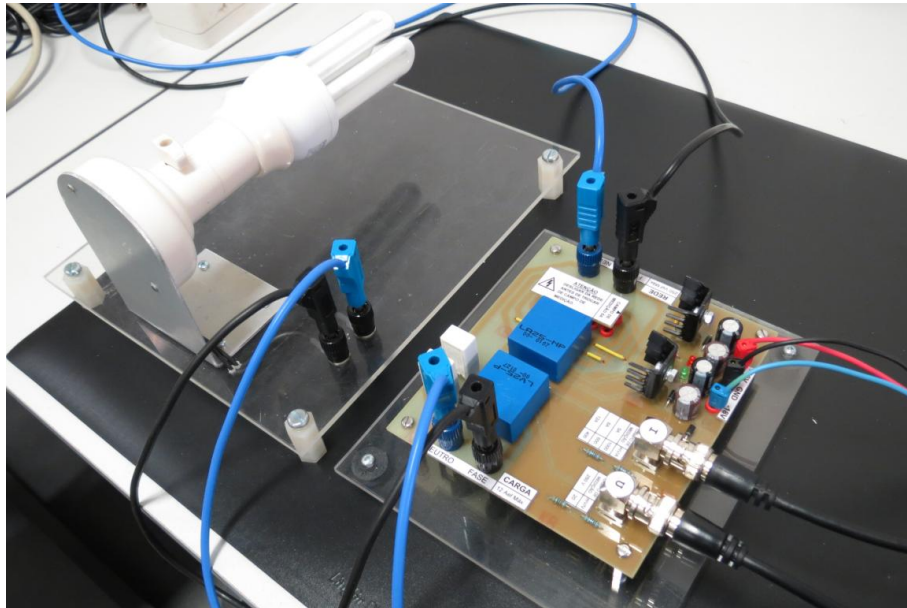




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação



Correntes Harmónicas em Lâmpadas Compactas – Sistema de Aquisição e Processamento de Sinal e Impacto nas Instalações Eléctricas

GONÇALO LUÍS MIRANDA TOSCANO DE MENDONÇA
(Licenciado em Engenharia Electrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica – Ramo de Automação e Electrónica Industrial

Orientador:

Professor Vasco Emanuel Anjos Soares

Orientador:

Professor Constantino Vital Sopa Soares

Júri:

Presidente: Professor Elmano da Fonseca Margato

Vogais:

Professor Vasco Emanuel Anjos Soares

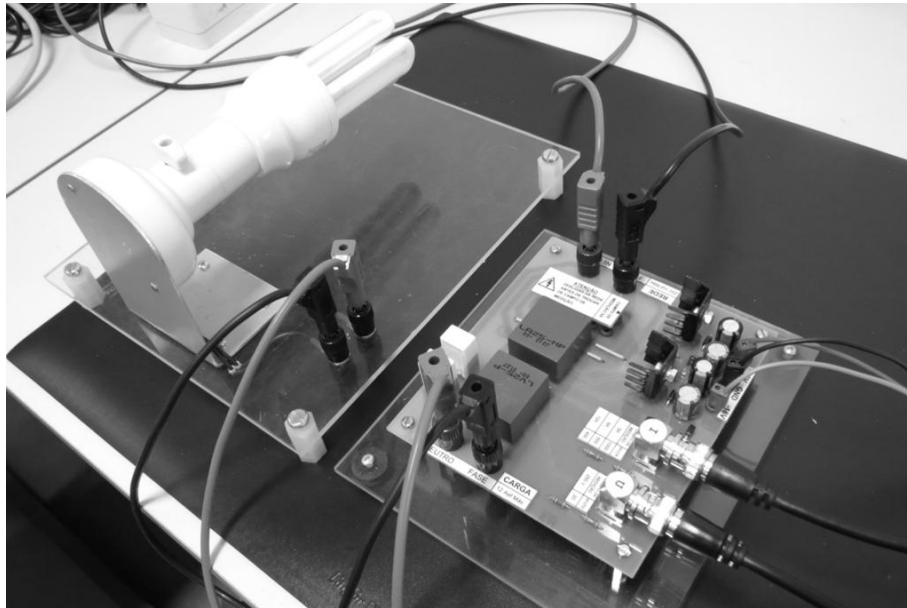
Professor Constantino Vital Sopa Soares

Professor Fernando Manuel Duarte Oliveira Nunes

Dezembro de 2013



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação



Correntes Harmónicas em Lâmpadas Compactas – Sistema de Aquisição e Processamento de Sinal e Impacto nas Instalações Eléctricas

GONÇALO LUÍS MIRANDA TOSCANO DE MENDONÇA
(Licenciado em Engenharia Electrotécnica)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica – Ramo de Automação e Electrónica Industrial

Orientador:

Professor Vasco Emanuel Anjos Soares

Orientador:

Professor Constantino Vital Sopa Soares

Júri:

Presidente: Professor Elmano da Fonseca Margato

Vogais:

Professor Vasco Emanuel Anjos Soares

Professor Constantino Vital Sopa Soares

Professor Fernando Manuel Duarte Oliveira Nunes

Dezembro de 2013

Resumo

Actualmente, a eficiência energética assume um papel importante em inúmeros sectores. Procura-se cada vez mais realizar uma utilização racional da energia e minimizar os seus custos associados.

A substituição de sistemas de iluminação clássicos por outros de maior eficiência é uma das várias medidas tomadas neste sentido. Nos últimos anos tem sido promovida a substituição das lâmpadas incandescentes clássicas por outras fontes de luz artificial equivalentes e de maior eficiência, tais como as lâmpadas fluorescentes compactas e mais recentemente a iluminação com recurso a LED.

Apesar da clara vantagem proporcionada por estes equipamentos em termos energéticos e, conseqüentemente, económicos, a sua utilização pode ter algumas implicações relacionadas com a qualidade de energia na rede eléctrica.

Neste contexto foi concebido um sistema de aquisição e processamento de sinal para avaliar as formas de onda de corrente e conteúdo harmónico que estas cargas promovem na rede eléctrica e determinar a conformidade com a normalização em vigor.

Palavras-chave: lâmpadas compactas fluorescentes; aquisição e processamento de sinal; conteúdo harmónico.

Abstract

Nowadays, energy efficiency plays an important role in numerous activity sectors. The goal of making rational use of energy and reduce its costs is being increasingly pursued.

The replacement of classic lighting systems with kinds of lighting which have a higher energy efficiency is one of the several steps taken in this direction. In the past years, traditional incandescent lamps have been replaced with other artificial light sources of higher efficiency, such as compact fluorescent lamps and LED lighting.

Despite the obvious advantages provided by these devices in terms of energy usage and operating costs, their usage may arise power quality issues on the electrical grid.

In this context, an acquisition and signal processing system has been developed in order to assess the current waveforms and harmonic content produced by these kinds of loads on the electrical grid and also to determine compliance with electromagnetic standards.

Keywords: compact fluorescent lamp; data acquisition; harmonics.

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Professor Vasco Soares e Professor Constantino Soares, pela sugestão do tema da dissertação, orientação, disponibilidade e apoio inexcedível ao longo do desenvolvimento deste trabalho,

Ao Eng. Paulo Dinis da OSRAM, pela cedência de amostras de lâmpadas para a realização dos ensaios experimentais,

Ao Rodrigo Breno, pelo contributo dado na concepção da placa de condicionamento de sinal e consequentes ensaios experimentais,

Aos colegas que me acompanharam ao longo do meu percurso académico, não só no Mestrado como também na Licenciatura,

Por último, mas não menos importante, pelo apoio fundamental prestado pela minha família e amigos,

A todos vós, que contribuíram de alguma forma para a execução deste trabalho, expresso aqui a minha gratidão.

Índice de Conteúdos

| | |
|--|------|
| Resumo | i |
| Abstract..... | ii |
| Agradecimentos | iii |
| Índice de Conteúdos | iv |
| Índice de Tabelas | viii |
| Índice de Figuras | xi |
| Lista de Acrónimos..... | xv |
| Definições | xvi |
| 1. Introdução..... | 1 |
| 1.1. Motivação | 1 |
| 1.2. Objectivos | 2 |
| 1.3. Estrutura da Dissertação | 2 |
| 2. Tipos de iluminação mais frequentes nas instalações eléctricas de baixa tensão..... | 4 |
| 2.1. Principais grandezas e unidades fotométricas | 4 |
| 2.1.1. Espectro visível da luz | 4 |
| 2.1.2. Fluxo luminoso | 5 |
| 2.1.3. Iluminância | 5 |
| 2.1.4. Intensidade luminosa | 5 |
| 2.1.5. Luminância | 5 |
| 2.1.6. Temperatura de cor | 6 |
| 2.1.7. Índice de Restituição Cromática (IRC)..... | 6 |
| 2.1.8. Eficiência luminosa | 6 |
| 2.2. Tipos de lâmpadas | 7 |
| 2.2.1. Lâmpadas Incandescentes..... | 7 |
| 2.2.2. Lâmpadas de Halogéneo..... | 9 |

| | |
|--|----|
| 2.2.3. Lâmpadas Fluorescentes Tubulares | 10 |
| 2.2.4. Lâmpadas Fluorescentes Compactas | 12 |
| 2.2.5. Lâmpadas de LED (Díodos Emissores de Luz)..... | 14 |
| 3. Caracterização das lâmpadas fluorescentes compactas | 16 |
| 3.1. Características das lâmpadas a analisar nos ensaios experimentais | 16 |
| 3.2. Normalização Internacional sobre a Compatibilidade Electromagnética..... | 18 |
| 3.2.1. Norma IEC 61000-3-2 | 18 |
| 3.2.1.1. Primeiro conjunto de requisitos referente aos limites de corrente das harmónicas ímpares | 19 |
| 3.2.1.2. Segundo conjunto de requisitos referente à forma de onda da corrente e à 3ª e 5ª harmónicas | 21 |
| 3.2.2. Considerações e outras normas relevantes | 24 |
| 3.3. Circuito-tipo utilizado nas lâmpadas fluorescentes compactas | 26 |
| 3.3.1. Análise das correntes do rectificador monofásico em ponte não controlado com carga capacitiva | 27 |
| 3.3.2. Aproximação para determinação dos parâmetros da carga do rectificador . | 30 |
| 3.3.3. Determinação de uma expressão para a identificação do ponto de início de condução do rectificador | 37 |
| 3.3.4. Análise de Fourier das correntes do rectificador | 40 |
| 3.3.4.1. Determinação dos coeficientes da série de Fourier para a corrente i_{rdc} | 41 |
| 3.3.4.2. Determinação dos coeficientes da série de Fourier para a corrente i_r .. | 47 |
| 3.3.4.3. Validação de resultados da análise de Fourier das correntes do rectificador..... | 51 |
| 4. <i>Hardware</i> e <i>software</i> de condicionamento e aquisição de sinal para ensaios experimentais..... | 56 |
| 4.1. Descrição do <i>hardware</i> | 56 |
| 4.2. Dimensionamento dos transdutores | 58 |
| 4.3. Descrição do <i>software</i> | 60 |

| | |
|---|------------|
| 4.3.1. Painel frontal do programa desenvolvido em LabVIEW | 62 |
| 4.3.2. Diagrama de blocos do programa desenvolvido em LabVIEW | 66 |
| 4.3.3. Validação do <i>software</i> desenvolvido em LabVIEW - comparação com MATLAB | 74 |
| 5. Resultados Experimentais | 77 |
| 5.1. Ensaio de determinação do <i>ripple</i> | 80 |
| 5.2. Resultados experimentais numa instalação eléctrica monofásica | 85 |
| 5.2.1. Lâmpada 1: Duluxstar Mini Twist 23W E27 | 86 |
| 5.2.2. Lâmpada 2: Dulux Intelligent Sensor 15W E27..... | 88 |
| 5.2.3. Lâmpada 3: Dulux EL Longlife 11W E14 | 90 |
| 5.2.4. Lâmpada 4: Dulux Superstar Classic A 5W E27..... | 92 |
| 5.2.5. Lâmpada 5: Dulux EL Longlife 20W E27 | 94 |
| 5.2.6. Lâmpada 6: Duluxstar 8W E14 | 96 |
| 5.2.7. Lâmpada 7: Duluxstar Mini Bullet T 7W E27 | 98 |
| 5.2.8. Lâmpada 8: Dulux EL Economy 8W E27 | 100 |
| 5.2.9. Lâmpada 9: Parathom PAR16 5W GU10..... | 102 |
| 5.2.10. Lâmpada 10: Parathom Pro PAR16 Advanced 10W GU10..... | 104 |
| 5.2.11. Ensaio das lâmpadas 3 e 9 em paralelo numa única fase | 106 |
| 5.2.12. Ensaio das lâmpadas 3 e 10 em paralelo numa única fase | 108 |
| 5.2.13. Ensaio das lâmpadas 1, 3, 4, 5, 6 e 8 em paralelo numa única fase | 110 |
| 5.3. Resultados experimentais numa instalação eléctrica trifásica com neutro | 112 |
| 5.3.1. Ensaio das lâmpadas distribuídas por 3 fases | 113 |
| 5.4. Resumo de resultados | 116 |
| 6. Conclusões e propostas de trabalhos futuros..... | 118 |
| 6.1. Conclusões..... | 118 |
| 6.2. Propostas de trabalhos futuros | 122 |
| Referências Bibliográficas | 123 |

| | |
|--|-----|
| Anexos | 126 |
| Anexo 1 – Modelo implementado em MATLAB/Simulink para simulações | 126 |
| Anexo 2 – Placa de circuito impresso do condicionador de sinal..... | 128 |
| Anexo 3 – Código em MATLAB para comparação de resultados com LabVIEW... | 129 |
| Anexo 4 – Código em MATLAB para tratamento dos dados adquiridos experimentalmente..... | 131 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Características das lâmpadas a ensaiar | 17 |
| Tabela 3.2 – Parâmetros luminotécnicos das lâmpadas a ensaiar | 17 |
| Tabela 3.3 – Limites harmônicos de corrente para equipamentos de Classe D | 20 |
| Tabela 3.4 – Limites harmônicos de corrente para equipamentos de Classe A | 20 |
| Tabela 3.5 – Primeiro conjunto de requisitos referente aos limites de corrente das harmônicas ímpares | 21 |
| Tabela 3.6 – Segundo conjunto de requisitos referente à forma de onda da corrente e à 3ª e 5ª harmônicas | 23 |
| Tabela 3.7 – Valores de ϕ e β obtidos através de cálculo em MATLAB | 38 |
| Tabela 3.8 – Amplitudes harmônicas de i_{rdc} | 52 |
| Tabela 3.9 – Amplitudes harmônicas de i_r | 52 |
| Tabela 4.1 – Amplitudes harmônicas da onda dente de serra obtidas em LabVIEW e MATLAB | 75 |
| Tabela 5.1 – Resumo dos valores de tensões medidos no condensador de cada lâmpada | 82 |
| Tabela 5.2 – Capacitância e tensão nominal do condensador utilizado em cada lâmpada | 82 |
| Tabela 5.3 – Valores dos condensadores calculados teoricamente e valores reais do condensador para cada lâmpada ensaiada | 83 |
| Tabela 5.4 – Parâmetros R e C utilizados nas simulações em MATLAB/Simulink | 84 |
| Tabela 5.5 – Lâmpada 1: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 86 |
| Tabela 5.6 – Lâmpada 1: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 86 |
| Tabela 5.7 – Lâmpada 2: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 88 |
| Tabela 5.8 – Lâmpada 2: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 88 |
| Tabela 5.9 – Lâmpada 3: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 90 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 5.10 – Lâmpada 3: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 90 |
| Tabela 5.11 – Lâmpada 4: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 92 |
| Tabela 5.12 – Lâmpada 4: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 92 |
| Tabela 5.13 – Lâmpada 5: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 94 |
| Tabela 5.14 – Lâmpada 5: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 94 |
| Tabela 5.15 – Lâmpada 6: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 96 |
| Tabela 5.16 – Lâmpada 6: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 96 |
| Tabela 5.17 – Lâmpada 7: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 98 |
| Tabela 5.18 – Lâmpada 7: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 98 |
| Tabela 5.19 – Lâmpada 8: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 100 |
| Tabela 5.20 – Lâmpada 8: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 100 |
| Tabela 5.21 – Lâmpada 9: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 102 |
| Tabela 5.22 – Lâmpada 9: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 102 |
| Tabela 5.23 – Lâmpada 10: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 104 |
| Tabela 5.24 – Lâmpada 10: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2 | 104 |
| Tabela 5.25 – Ensaio das lâmpadas 3 e 9 em paralelo: correntes obtidas experimentalmente | 106 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 5.26 – Ensaio das lâmpadas 3 e 10 em paralelo: correntes obtidas experimentalmente | 108 |
| Tabela 5.27 – Ensaio de 6 lâmpadas compactas fluorescentes em paralelo: correntes obtidas | 110 |
| Tabela 5.28 – Ensaio das lâmpadas distribuídas por 3 fases: correntes obtidas experimentalmente | 113 |
| Tabela 5.29 – Resumo dos valores de tensões, correntes e distorções harmónicas obtidas em cada ensaio monofásico | 116 |
| Tabela 5.30 – Resumo dos valores de correntes obtidas em cada ensaio monofásico | 116 |
| Tabela 5.31 – Resumo dos valores de potências, factores de potência e de desfasamento obtidos em cada ensaio monofásico | 117 |
| Tabela 5.32 – Resumo dos valores de correntes obtidos no ensaio trifásico | 117 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Constituição de uma lâmpada incandescente de rosca [3] | 7 |
| Figura 2.2 – Lâmpada de halogéneo reflectora | 10 |
| Figura 2.3 – Lâmpadas fluorescentes tubulares..... | 11 |
| Figura 2.4 – Lâmpada fluorescente compacta integrada de casquilho E27..... | 13 |
| Figura 2.5 – Lâmpada de LED de casquilho GU10 | 15 |
| Figura 3.1 – Fotografia das embalagens comerciais de algumas lâmpadas OSRAM utilizadas nos ensaios experimentais | 16 |
| Figura 3.2 – Parâmetros de corrente e de ângulo de fase a cumprir pelos equipamentos de Classe C | 22 |
| Figura 3.3 – Esquema eléctrico de uma lâmpada fluorescente compacta [12]..... | 26 |
| Figura 3.4 – Rectificador monofásico em ponte não controlado com carga capacitiva . | 27 |
| Figura 3.5 – Exemplo da evolução da tensão no condensador | 31 |
| Figura 3.6 – Períodos das correntes i_{rdc} e i_r obtidas através das expressões teóricas para uma lâmpada de 20 W | 35 |
| Figura 3.7 – Períodos das correntes i_{rdc} e i_r obtidas através de simulação para uma lâmpada de 20 W | 35 |
| Figura 3.8 – Tensões no lado alternado e no lado contínuo do rectificador obtidas através de simulação | 36 |
| Figura 3.9 – Valores de ϕ e β obtidos através cálculo em MATLAB | 37 |
| Figura 3.10 – Valores de ϕ e β obtidos e polinómio de regressão..... | 39 |
| Figura 3.11 – Períodos das correntes i_{rdc} e i_r obtidas após análise de Fourier para uma lâmpada de 20 W | 53 |
| Figura 3.12 – Períodos das correntes i_{rdc} e i_r obtidas através de simulação para uma lâmpada de 20 W | 53 |
| Figura 3.13 – Espectro harmónico da corrente i_{rdc} obtido após análise de Fourier..... | 54 |
| Figura 3.14 – Espectro harmónico da corrente i_{rdc} obtido através de simulação..... | 54 |
| Figura 3.15 – Espectro harmónico da corrente i_r obtido após análise de Fourier | 55 |
| Figura 3.16 – Espectro harmónico da corrente i_r obtido através de simulação | 55 |
| Figura 4.1 – Consola BNC-2120 da National Instruments..... | 56 |
| Figura 4.2 – Placa de condicionamento de sinal com transdutores LA 25-NP e LV 25-P | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.3 – Esquema da placa de condicionamento de sinal com os transdutores LV 25-P e LA 25-NP | 59 |
| Figura 4.4 – Pormenor do painel frontal do programa desenvolvido em LabVIEW | 61 |
| Figura 4.5 – Pormenor do diagrama de blocos do programa desenvolvido em LabVIEW | 61 |
| Figura 4.6 – Selector para aquisição ou simulação e botões de pressão “STOP” e “SAVE” | 62 |
| Figura 4.7 – Exemplo do conteúdo do ficheiro <i>Excel</i> exportado pelo LabVIEW | 63 |
| Figura 4.8 – Mostradores digitais para as várias grandezas medidas ou calculadas | 63 |
| Figura 4.9 – Gráfico temporal e espectros harmónicos da tensão e da corrente | 64 |
| Figura 4.10 – Efeito da deriva de zero do transdutor de corrente | 65 |
| Figura 4.11 – Indicador e controlo para correcção da deriva de zero do transdutor de corrente | 65 |
| Figura 4.12 – Subprograma para configuração da aquisição de dados | 66 |
| Figura 4.13 – Blocos: a) <i>Sub-VI DAQmx Create Channel (AI-Voltage-Basic)</i> ; b) <i>DAQmx Timing (Sample Clock)</i> | 66 |
| Figura 4.14 – Blocos: a) <i>DAQmx Start Trigger (Digital Edge)</i> ; b) Restantes blocos | 67 |
| Figura 4.15 – Estrutura <i>Sequence Structure</i> | 68 |
| Figura 4.16 – Blocos para realização da FFT, determinação de U e I , U_{1h} e I_{1h} , cálculos da potência aparente S e do ângulo φ_{1h} | 70 |
| Figura 4.17 – Estrutura <i>Formula Node</i> para cálculo de potências associadas à componente fundamental e cálculo da potência deformante, D | 71 |
| Figura 4.18 – Determinação das potências P_{nh} , Q_{nh} , S_{nh} , P e Q | 71 |
| Figura 4.19 – Estrutura <i>Formula Node</i> para cálculo do Factor de Potência e do Factor de Desfasamento | 72 |
| Figura 4.20 – Blocos <i>Distortion Measurements</i> para cálculo da THD | 72 |
| Figura 4.21 – Correcção manual da deriva de zero do transdutor de corrente | 73 |
| Figura 4.22 – Forma de onda do tipo de serra | 75 |
| Figura 4.23 – Espectros harmónicos da onda dente de serra obtidos em LabVIEW e MATLAB | 76 |
| Figura 5.1 – Fotografia do circuito eléctrico e do condensador de uma lâmpada fluorescente compacta | 77 |
| Figura 5.2 – Fotografia do ensaio experimental das seis lâmpadas fluorescentes compactas em paralelo | 78 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.3 – Formas de onda da tensão no condensador: a) Lâmpada 1, b) Lâmpada 3; c) Lâmpada 4; d) Lâmpada 5; e) Lâmpada 6; f) Lâmpada 8 | 81 |
| Figura 5.4 – Lâmpada 1: formas de onda de corrente e tensão observadas: a) resultados experimentais, b) simulação | 87 |
| Figura 5.5 – Lâmpada 1: espectro harmónico da corrente: a) resultados experimentais, b) simulação..... | 87 |
| Figura 5.6 – Lâmpada 2: formas de onda de corrente e tensão observadas experimentalmente..... | 89 |
| Figura 5.7 – Lâmpada 2: espectro harmónico da corrente obtido experimentalmente... | 89 |
| Figura 5.8 – Lâmpada 3: formas de onda de corrente e tensão observadas: a) resultados experimentais, b) simulação | 91 |
| Figura 5.9 – Lâmpada 3: espectro harmónico da corrente: a) resultados experimentais, b) simulação..... | 91 |
| Figura 5.10 – Lâmpada 4: formas de onda de corrente e tensão observadas: a) resultados experimentais, b) simulação | 93 |
| Figura 5.11 – Lâmpada 4: espectro harmónico da corrente: a) resultados experimentais, b) simulação..... | 93 |
| Figura 5.12 – Lâmpada 5: formas de onda de corrente e tensão observadas: a) resultados experimentais, b) simulação | 95 |
| Figura 5.13 – Lâmpada 5: espectro harmónico da corrente: a) resultados experimentais, b) simulação..... | 95 |
| Figura 5.14 – Lâmpada 6: formas de onda de corrente e tensão observadas: a) resultados experimentais, b) simulação | 97 |
| Figura 5.15 – Lâmpada 6: espectro harmónico da corrente: a) resultados experimentais, b) simulação..... | 97 |
| Figura 5.16 – Lâmpada 7: formas de onda de corrente e tensão observadas experimentalmente..... | 99 |
| Figura 5.17 – Lâmpada 7: espectro harmónico da corrente obtido experimentalmente. | 99 |
| Figura 5.18 – Lâmpada 8: formas de onda de corrente e tensão observadas: a) resultados experimentais, b) simulação | 101 |
| Figura 5.19 – Lâmpada 8: espectro harmónico da corrente: a) resultados experimentais, b) simulação..... | 101 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.20 – Lâmpada 9: formas de onda de corrente e tensão observadas experimentalmente..... | 103 |
| Figura 5.21 – Lâmpada 9: espectro harmónico da corrente obtido experimentalmente | 103 |
| Figura 5.22 – Lâmpada 10: formas de onda de corrente e tensão observadas experimentalmente..... | 105 |
| Figura 5.23 – Lâmpada 10: espectro harmónico da corrente obtido experimentalmente | 105 |
| Figura 5.24 – Ensaio das lâmpadas 3 e 9 em paralelo: formas de onda de corrente e tensão observadas experimentalmente..... | 107 |
| Figura 5.25 – Ensaio das lâmpadas 3 e 9 em paralelo: espectro harmónico da corrente obtido experimentalmente | 107 |
| Figura 5.26 – Ensaio das lâmpadas 3 e 10 em paralelo: formas de onda de corrente e tensão observadas experimentalmente..... | 109 |
| Figura 5.27 – Ensaio das lâmpadas 3 e 10 em paralelo: espectro harmónico da corrente obtido experimentalmente | 109 |
| Figura 5.28 – Ensaio de 6 lâmpadas compactas fluorescentes em paralelo: formas de onda de corrente e tensão observadas: a) resultados experimentais, b) simulação | 111 |
| Figura 5.29 – Ensaio de 6 lâmpadas compactas fluorescentes em paralelo: espectro harmónico da corrente: a) resultados experimentais, b) simulação..... | 111 |
| Figura 5.30 – Ensaio num sistema trifásico: formas de onda das tensões simples do sistema trifásico: a) resultados experimentais, b) simulação..... | 114 |
| Figura 5.31 – Ensaio num sistema trifásico: formas de onda das correntes de fase do sistema trifásico: a) resultados experimentais, b) simulação..... | 114 |
| Figura 5.32 – Ensaio num sistema trifásico: formas de onda da corrente de neutro do sistema trifásico: a) resultados experimentais, b) simulação..... | 114 |
| Figura 5.33 – Ensaio num sistema trifásico: espectro harmónico das correntes obtido experimentalmente: a) fase 1, c) fase 2, e) fase 3; espectro harmónico das correntes obtido através de simulação: b) fase 1, d) fase 2, f) fase 3 | 115 |
| Figura 5.34 – Ensaio num sistema trifásico: espectro harmónico da corrente de neutro: a) resultados experimentais, b) simulação | 115 |

Lista de Acrónimos

| | |
|-----|--|
| AC | Tensão/Corrente alternada (<i>Alternating Current</i>) |
| AI | Entrada analógica (<i>Analog Input</i>) |
| CSV | Valores separados por vírgulas (<i>Comma-separated values</i>) |
| DC | Tensão/Corrente contínua (<i>Direct Current</i>) |
| DPF | Factor de desfasamento (<i>Displacement Power Factor</i>) |
| FFT | Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>) |
| IEC | Comissão Electrotécnica Internacional (<i>International Electrotechnical Commission</i>) |
| IRC | Índice de Restituição Cromática (<i>Colour Rendering Index</i>) |
| LED | Díodo Emissor de Luz (<i>Light-Emitting Diode</i>) |
| PCI | <i>Peripheral Component Interconnect</i> |
| PF | Factor de Potência (<i>Power Factor</i>) |
| THD | Distorção Harmónica Total (<i>Total Harmonic Distortion</i>) |
| VI | Instrumento virtual (<i>Virtual Instrument</i>) |

Definições

As formas de onda de tensão e corrente, u e i , podem ser definidas por uma soma infinita de termos harmônicos conforme indicado nas expressões seguintes [1]:

$$\begin{cases} u = U_{DC} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_{nh} \cos(n\omega t + \alpha_{unh}) \\ i = I_{DC} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{nh} \cos(n\omega t + \alpha_{inh}) \end{cases} \quad (1.1)$$

Nas expressões indicadas, U_{DC} e I_{DC} representam os valores médios, ou seja, as componentes contínuas dos sinais de, respectivamente, tensão e corrente. Os termos U_{nh} e I_{nh} são os valores eficazes de cada uma das harmônicas múltiplas da frequência fundamental que compõem os sinais, representando o índice n a ordem da harmônica. Os seus ângulos de fase são respectivamente α_{unh} e α_{inh} . Considera-se que a harmônica de ordem 1 corresponde à frequência fundamental, sendo ω a sua frequência angular.

A determinação dos valores eficazes totais de tensão e corrente, U e I , pode ser realizada através das seguintes expressões seguintes:

$$U = \sqrt{U_{DC}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} U_{nh}^2} \quad (1.2)$$

$$I = \sqrt{I_{DC}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_{nh}^2} \quad (1.3)$$

Desta forma, o produto destes dois últimos valores resulta na potência aparente S , expressa por:

$$S = U I \quad (1.4)$$

A potência aparente S_{1h} associada à componente fundamental é dada pela seguinte equação:

$$S_{1h} = U_{1h}I_{1h} \quad (1.5)$$

Conhecendo os valores eficazes U_{nh} e I_{nh} assim como os ângulos de fase α_{unh} e α_{inh} , é possível calcular o desfasamento entre tensão e corrente para cada termo de igual ordem, φ_{nh} , segundo a expressão:

$$\varphi_{nh} = \alpha_{unh} - \alpha_{inh} \quad (1.6)$$

O desfasamento entre tensão e corrente à frequência fundamental, φ_{1h} , resulta na diferença entre os ângulos α_{u1h} e α_{i1h} , segundo a equação:

$$\varphi_{1h} = \alpha_{u1h} - \alpha_{i1h} \quad (1.7)$$

As potências activa P_{nh} e reactiva Q_{nh} para cada termo harmónico são dadas pelas equações seguintes:

$$P_{nh} = U_{nh}I_{nh} \cos \varphi_{nh} \quad (1.8)$$

$$Q_{nh} = U_{nh}I_{nh} \sen \varphi_{nh} \quad (1.9)$$

As potências activa P_{1h} e reactiva Q_{1h} associadas à componente fundamental são calculadas através das seguintes expressões:

$$P_{1h} = U_{1h}I_{1h} \cos \varphi_{1h} \quad (1.10)$$

$$Q_{1h} = U_{1h}I_{1h} \sen \varphi_{1h} \quad (1.11)$$

A potência aparente S_{nh} associada a cada termo harmónico é obtida pela equação:

$$S_{nh} = \sqrt{P_{nh}^2 + Q_{nh}^2} \quad (1.12)$$

As potências totais activa, P , e reactiva, Q , são determinadas pelo somatório das várias potências harmónicas P_{nh} e Q_{nh} , sendo:

$$P = P_{DC} + \sum_{n=1}^{\infty} P_{nh} \quad (1.13)$$

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_{nh} \quad (1.14)$$

Atendendo às expressões acima descritas, a potência deformante D pode ser calculada através de:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (1.15)$$

O Factor de Potência, PF (PF – *Power Factor*) consiste na relação entre as potências totais activa P e aparente S , podendo ser calculado pela seguinte expressão [2]:

$$PF = \frac{P}{S} \quad (1.16)$$

Outro parâmetro relevante é o Factor de Desfasamento, FD (DPF – *Displacement Power Factor*), também designado por $\cos \varphi$ ou $\cos \varphi_{1h}$. Este factor traduz o desfasamento associado à componente fundamental, expresso por:

$$DPF = \cos \varphi_{1h} = \frac{P_{1h}}{S_{1h}} \quad (1.17)$$

As Distorções Harmónicas Totais de Tensão e de Corrente, respectivamente THD_U e THD_I , consistem no rácio entre a soma das harmónicas e a componente fundamental e podem ser definidas pelas expressões seguintes, em percentagem [2]:

$$THD_U(\%) = \sqrt{\frac{U^2}{U_{1h}^2} - 1} \times 100 \quad (1.18)$$

$$THD_I(\%) = \sqrt{\frac{I^2}{I_{1h}^2} - 1} \times 100 \quad (1.19)$$

1. Introdução

Actualmente, a eficiência energética assume um papel importante em inúmeros sectores. Procura-se cada vez mais realizar uma utilização racional da energia e minimizar os seus custos associados.

A substituição de sistemas de iluminação clássicos por outros de maior eficiência é uma das várias medidas tomadas neste sentido. Nos últimos anos tem sido promovida a substituição das lâmpadas incandescentes clássicas por outras fontes de luz artificial equivalentes e de maior eficiência, tais como as lâmpadas fluorescentes compactas e, mais recentemente, a iluminação com recurso a LED.

Apesar da clara vantagem proporcionada por estes equipamentos em termos energéticos e, conseqüentemente, económicos, a sua utilização pode ter algumas implicações relacionadas com a qualidade de energia na rede eléctrica.

Face a este problema, foi estabelecida normalização internacional onde se definem os critérios de qualidade de energia a cumprir pelos equipamentos que utilizam a rede eléctrica, mais especificamente a emissão de correntes harmónicas.

1.1. Motivação

Os fabricantes dos equipamentos de iluminação referidos, lâmpadas do tipo fluorescentes compactas e de LED, devem assegurar-se que os seus produtos cumprem a normalização sobre compatibilidade electromagnética, que estipula limites máximos para as correntes harmónicas. No entanto, nas características técnicas dos equipamentos publicadas pelos fabricantes normalmente não é indicado o conteúdo harmónico existente.

Devido à crescente utilização de lâmpadas compactas fluorescentes e lâmpadas de LED, pretende-se conceber um sistema de aquisição e processamento de sinal para determinar a conformidade com as normas e quantificar o conteúdo harmónico que estes dispositivos injectam na rede eléctrica.

1.2. Objectivos

No presente trabalho pretendem-se atingir os seguintes objectivos:

- Identificar os tipos de iluminação artificial mais frequentes;
- Caracterizar as lâmpadas a ensaiar e enquadrá-las na normalização aplicável;
- Estudar o circuito-tipo utilizado nas lâmpadas;
- Desenvolver um sistema de aquisição e processamento de sinal;
- Realizar os ensaios experimentais;
- Analisar os resultados obtidos e retirar conclusões.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, que se descrevem sucintamente de seguida.

No primeiro capítulo são apresentados os objectivos deste trabalho e a descrição da sua estrutura.

No segundo subcapítulo realiza-se um estudo sobre os dispositivos de iluminação mais frequentemente aplicados em instalações eléctricas de baixa tensão. São introduzidas algumas noções de luminotecnia e posteriormente os tipos de lâmpadas mais comuns são caracterizados.

No terceiro capítulo são enunciadas as características das lâmpadas fluorescentes e de LED a usar nos ensaios experimentais. De seguida analisa-se a Normalização Internacional sobre a Compatibilidade Electromagnética aplicável às lâmpadas em questão. Finalmente, caracteriza-se o circuito-tipo mais frequente nestes tipos de lâmpadas, as correntes que produz e a sua análise harmónica.

No quarto capítulo descreve-se o sistema de condicionamento e aquisição de sinal para os ensaios experimentais. Apresentam-se as especificações do *hardware* e descreve-se o *software* desenvolvido.

No quinto capítulo são evidenciados os resultados experimentais realizados.

Finalmente, no sexto capítulo apresentam-se conclusões sobre os resultados, sobre o trabalho desenvolvido e são ainda apresentadas sugestões de continuidade futura dentro da temática desta dissertação.

2. Tipos de iluminação mais frequentes nas instalações eléctricas de baixa tensão

Neste capítulo é realizado um estudo sobre as principais fontes de luz artificial utilizadas nas instalações eléctricas de baixa tensão, com particular destaque para os dispositivos de iluminação interior em edifícios destinados aos sectores residencial, comercial e industrial.

No primeiro subcapítulo introduzem-se algumas noções de luminotecnia e respectivas grandezas fotométricas, as quais constituem parâmetros objectivos para a comparação entre os vários tipos de iluminação em análise e que são indicadores da qualidade da iluminação por estes produzida.

Posteriormente, num segundo subcapítulo são abordados os principais tipos de fontes de luz artificial, ou lâmpadas, incluindo uma descrição dos seus princípios de funcionamento, os seus parâmetros luminotécnicos e a enumeração das vantagens e desvantagens associadas a cada tecnologia.

2.1. Principais grandezas e unidades fotométricas

2.1.1. Espectro visível da luz

O espectro visível da luz, também designado apenas por luz, consiste numa pequena gama de comprimentos de onda da radiação electromagnética que é detectada pelo olho humano [3]. Esta gama está compreendida entre os comprimentos de onda de, aproximadamente, 380 a 780 nm. A radiação electromagnética cujo comprimento de onda é inferior a 380 nm, designada por radiação ultravioleta, não é detectada pelo olho humano, tal como a radiação infravermelha de comprimentos de onda superiores a 780 nm [4].

2.1.2. Fluxo luminoso

O fluxo luminoso, cuja unidade é o lúmen (lm), consiste na quantidade total de luz emitida por uma fonte de luz em todas as direcções e ponderada relativamente à sensibilidade espectral do olho humano [5]. Desta forma, para a determinação do fluxo luminoso apenas é considerado o espectro de luz visível, excluindo os comprimentos de onda de radiação electromagnética não detectáveis pelo olho humano.

2.1.3. Iluminância

A iluminância representa o fluxo luminoso incidente numa superfície por unidade de área e a sua unidade é o lux (lm/m^2). Assim sendo, uma iluminância de 1 lux corresponde a um fluxo luminoso de 1 lm que incide numa superfície de 1 m^2 de área.

2.1.4. Intensidade luminosa

Define-se intensidade luminosa como sendo a quantidade de fluxo luminoso emitida por uma fonte de luz e orientada numa determinada direcção. A unidade de intensidade luminosa é a candela (cd) [6].

2.1.5. Luminância

A luminância, cuja unidade é a candela por metro quadrado (cd/m^2), consiste na razão entre a intensidade luminosa emitida numa determinada direcção e incidente ou reflectida numa dada superfície [6]. A luminância é um indicador da sensação de claridade que uma determinada fonte de luz produz no olho humano, quando observando a superfície a partir de um certo ângulo [4].

2.1.6. Temperatura de cor

A temperatura de cor representa a aparência da cor emitida por uma fonte de luz. Por definição, a temperatura de cor de uma dada lâmpada é a temperatura a que é necessário aquecer um corpo negro para que este emita radiação luminosa de aparência de cor igual à da lâmpada considerada [3]. A temperatura de cor é expressa em graus Kelvin (K) e não indica a temperatura de funcionamento de uma fonte de luz, mas sim a tonalidade de cor da luz emitida, como já referido.

Uma fonte de luz com uma temperatura de cor baixa apresenta uma cor branca ligeiramente amarelada, enquanto uma temperatura de cor mais elevada tem uma tonalidade branca a tender para o azul. Desta forma, temperaturas de cor reduzidas e elevadas são, respectivamente designadas por cores “quentes” e cores “frias”. Consequentemente, considera-se que as temperaturas entre 3000 e 4000 K correspondem a cores neutras (próximas da tonalidade branca), até 3000 K tratam-se de tons quentes e acima de 4000 K são tonalidades de cor frias.

2.1.7. Índice de Restituição Cromática (IRC)

O Índice de Restituição Cromática, IRC (CRI – *Colour Rendering Index*), traduz a capacidade de uma fonte de luz artificial reproduzir correctamente as cores de um objecto comparativamente com a iluminação natural. É quantificado numa escala de 0 (pior) a 100 (melhor), sendo que a luz natural apresenta um Índice de Restituição Cromática igual a 100 [3].

2.1.8. Eficiência luminosa

A eficiência luminosa de uma fonte de luz consiste no rácio entre o fluxo luminoso emitido e a potência eléctrica (activa) consumida. Expressa-se em unidades de lúmen por Watt (lm/W) e pode também representar a quantidade de fluxo luminoso emitido por uma fonte de luz a partir de uma potência de 1 Watt [3]. Desta forma, a eficiência luminosa é uma grandeza adequada para comparações entre fontes de luz de diferentes tipos.

2.2. Tipos de lâmpadas

2.2.1. Lâmpadas Incandescentes

O conceito de lâmpada incandescente e os seus primeiros exemplares surgiram no final século XIX, mas foi graças aos aperfeiçoamentos realizados por Thomas Edison que a sua produção e comercialização foi tornada possível [5], sendo ainda hoje a fonte de luz mais conhecida.

A lâmpada incandescente consiste numa ampola de vidro que contém um filamento e que está preenchida por um gás inerte, conforme se ilustra na seguinte figura.

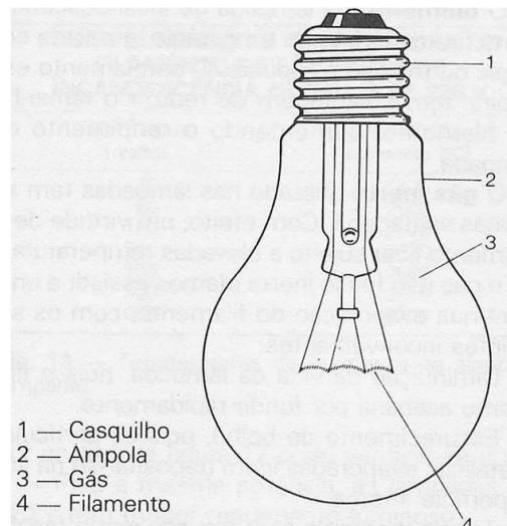


Figura 2.1 – Constituição de uma lâmpada incandescente de rosca [3]

A base da lâmpada, ou casquilho, é onde se encontram os contactos eléctricos e tem o formato de rosca. Os casquilhos mais comuns são os casquilhos de rosca E (Edison) do tipo E14 ou E27, embora existam também casquilhos de baioneta. O filamento, normalmente feito de tungsténio, ao ser percorrido por uma corrente eléctrica aquece e dá origem ao fenómeno de incandescência, emitindo luz visível.

Devido à passagem da corrente eléctrica, os átomos de tungsténio do filamento têm tendência a evaporar e a depositar-se no interior da ampola de vidro, podendo provocar o escurecimento da lâmpada. O gás inerte contido no interior da ampola de vidro

contribui para minimizar a evaporação [3], embora o desgaste do filamento seja inevitável, o que implica um tempo de vida da lâmpada relativamente reduzido.

Desta forma, o tempo de vida médio das lâmpadas incandescentes é de cerca de 1000 h apenas [5]. A eficiência luminosa ronda os 15 lm/W, valor bastante reduzido, o que significa que são lâmpadas pouco eficientes, pois apenas 5% da energia eléctrica consumida é convertida em luz, sendo a restante energia libertada sob a forma de calor [5].

Devido à reduzida eficiência luminosa das lâmpadas incandescentes e segundo directivas da União Europeia, a comercialização deste tipo de lâmpadas destinadas a uso doméstico encontra-se proibida desde Setembro de 2012 [4] [7], com algumas excepções para aplicações especiais tais como lâmpadas incandescentes para frigoríficos, fornos, entre outros. O objectivo destas directivas Europeias consiste em promover a substituição das lâmpadas incandescentes por outros tipos de maior eficiência como as lâmpadas fluorescentes compactas.

A qualidade da luz produzida pelas lâmpadas incandescentes é bastante satisfatória, possuindo um Índice de Restituição Cromática de aproximadamente 100 e uma temperatura de cor de cerca de 2700 K. Ao contrário de outros tipos de lâmpadas, o tempo de arranque das incandescentes é bastante curto, isto é, estas lâmpadas produzem o seu fluxo luminoso nominal quase instantaneamente após terem sido ligadas.

Em termos eléctricos, as lâmpadas incandescentes são cargas praticamente resistivas, de factor de potência unitário, ou seja, a potência activa consumida é igual à potência aparente. Não necessitam de balastos para o seu funcionamento e conseqüentemente podem ser directamente ligadas à instalação eléctrica. As lâmpadas incandescentes permitem ainda a utilização de reguladores de intensidade luminosa (*dimmers*), dispositivos que permitem variar o fluxo luminoso emitido através da regulação da potência activa entregue à lâmpada.

Apesar de todas estas vantagens enunciadas nos parágrafos anteriores, associadas aos custos de produção reduzidos, o tempo de vida médio das lâmpadas incandescentes e acima de tudo a sua eficiência luminosa medíocre constituem as principais desvantagens

deste tipo de lâmpadas, as quais ditaram o desenvolvimento de outras formas de iluminação artificial.

2.2.2. Lâmpadas de Halogéneo

As lâmpadas de halogéneo partilham muitas semelhanças com as lâmpadas incandescentes, especialmente no seu funcionamento. A principal diferença reside na adição de um gás halogéneo no interior da ampola de vidro, envolvendo o filamento de tungsténio [3] [5].

Tal como já referido para o caso das lâmpadas incandescentes, os átomos de tungsténio do filamento têm tendência a evaporar quando o filamento é percorrido pela corrente eléctrica. A adição do gás halogéneo dá origem a um efeito regenerativo, ou seja, o gás halogéneo combina-se com as partículas de tungsténio libertadas pelo filamento, depositando-as novamente no filamento e contribuindo para uma maior durabilidade da lâmpada [5] [6]. Este fenómeno tem a designação de ciclo de halogéneo. Devido às temperaturas elevadas necessárias ao funcionamento do ciclo de halogéneo, o invólucro destas lâmpadas é feito de quartzo [8].

Além de proporcionar um maior tempo de vida à lâmpada, o efeito regenerativo do halogéneo permite que o fluxo luminoso se mantenha aproximadamente uniforme ao longo do seu tempo de vida [8], o que se traduz numa eficiência luminosa ligeiramente superior à das lâmpadas incandescentes. Desta forma, as lâmpadas de halogéneo podem ter um tamanho mais compacto e produzir uma luz mais brilhante face às incandescentes [3] [5] [6].

Assim sendo, o tempo de vida médio das lâmpadas de halogéneo situa-se entre as 2000 e as 4000 h de funcionamento [8]. Tal como as incandescentes, possuem uma excelente capacidade de reprodução de cor, com um Índice de Restituição Cromática de aproximadamente 100 e temperatura de cor próxima dos 3000 K. A sua eficiência luminosa situa-se entre os 15 a 25 lm/W [6].

Tipicamente, os casquilhos mais usados nas lâmpadas de halogéneo são de rosca ou de pinos. Algumas destas lâmpadas, designadas por reflectoras, possuem um espelho dicróico que separa o feixe luminoso em diferentes comprimentos de onda, reflectindo apenas a luz de tonalidade mais branca [3]. Na figura seguinte apresenta-se uma lâmpada de halogéneo com um reflector dicróico e de casquilho de pinos GU10:



Figura 2.2 – Lâmpada de halogéneo reflectora

Em resumo, as lâmpadas de halogéneo são apenas o resultado de alguns melhoramentos efectuados nas lâmpadas de halogéneo. À excepção da maior durabilidade e eficiência destas últimas, ambos os tipos de lâmpadas partilham a maior parte das suas características, incluindo vantagens e desvantagens.

2.2.3. Lâmpadas Fluorescentes Tubulares

As lâmpadas fluorescentes tubulares possuem um invólucro designado por tubo de descarga. Nas extremidades deste tubo de vidro existem eléctrodos e o seu interior contém um gás, mais especificamente vapor de mercúrio a baixa pressão. Quando se aplica uma diferença de potencial aos eléctrodos estes emitem electrões que ionizam o gás, produzindo radiação ultravioleta [5] [8].

No entanto, a radiação ultravioleta é invisível ao olho humano. Desta forma, o interior do tubo é revestido por uma substância fluorescente que transforma a radiação ultravioleta em luz visível, através do fenómeno da fluorescência [8] [9].

Como o próprio nome indica, as lâmpadas fluorescentes tubulares possuem um formato em tubo e necessitam de ser instaladas numa luminária específica [3]. Os formatos mais comuns de tubo são o T5, o T8 e o T12.



Figura 2.3 – Lâmpadas fluorescentes tubulares

Para o seu funcionamento, as lâmpadas fluorescentes tubulares não podem ser directamente ligadas à instalação eléctrica, pois necessitam de um balastro. Um balastro é um dispositivo que gera a tensão necessária para o arranque e que limita a corrente de funcionamento de forma a evitar danos na lâmpada [9]. Existem balastros electromagnéticos e electrónicos, sendo estes últimos os mais usados actualmente, principalmente devido à sua maior eficiência e à reduzida cintilação da luz produzida [6].

Em termos de parâmetros luminotécnicos, existe uma gama alargada de temperaturas de cor disponíveis nas lâmpadas fluorescentes tubulares. A substância fluorescente que reveste o interior do tubo é responsável pela tonalidade de cor da luz emitida [5], portanto alterando a substância fluorescente é possível obter praticamente qualquer temperatura de cor. Tipicamente, as lâmpadas fluorescentes tubulares mais comuns apresentam temperaturas de cor entre os 2700 e os 8000 K. O Índice de Restituição Cromática situa-se entre 60 e 90 [8], ou seja, no melhor dos casos encontra-se um pouco aquém dos valores alcançados pelas lâmpadas incandescentes e de halogéneo.

No entanto, as grandes vantagens das lâmpadas fluorescentes tubulares são a sua elevada eficiência luminosa e durabilidade. A eficiência luminosa varia entre os 60 e os 100 lm/W e o tempo de vida médio situa-se entre 8000 a 18000 h [6] [8], embora os

ciclos de comutação frequentes (ligar/desligar) reduzam substancialmente o seu tempo de vida.

As lâmpadas fluorescentes apresentam como principais desvantagens o seu tempo de arranque, o qual pode demorar alguns segundos, e os custos iniciais significativamente superiores aos das outras lâmpadas já abordadas. Além do próprio custo associado às lâmpadas fluorescentes em si, a necessidade da utilização de balastros e da luminária obrigam a um investimento inicial algo elevado. Em termos eléctricos, o conjunto do balastro e da lâmpada representa uma carga não linear produtora de harmónicas de corrente, o que pode ter implicações em termos de poluição harmónica na instalação eléctrica.

Apesar destas desvantagens, o seu longo tempo de vida e excelente eficiência luminosa, que se traduzem em custos de operação diminutos, são os factores primordiais para a utilização das lâmpadas fluorescentes tubulares em larga escala. A grande maioria dos edifícios pertencentes ao sector industrial ou comercial dispõe de instalações de lâmpadas fluorescentes tubulares, sendo estas a alternativa mais frequente às soluções tradicionais com lâmpadas incandescentes e halogéneas.

2.2.4. Lâmpadas Fluorescentes Compactas

As lâmpadas fluorescentes compactas têm um princípio de funcionamento igual ao das lâmpadas fluorescentes tubulares já descritas, embora com algumas diferenças construtivas. O seu tubo de descarga é mais compacto e tem um formato esférico ou elipsoidal, podendo ainda consistir numa combinação de vários pequenos tubos de dimensões reduzidas [3] [8].

Tal como nas lâmpadas fluorescentes tubulares, é igualmente necessária a utilização de balastros. Na maior parte das lâmpadas fluorescentes compactas, o balastro electrónico encontra-se integrado na base da própria lâmpada, sendo que estas lâmpadas são por vezes designadas por lâmpadas fluorescentes compactas integradas [8].

Devido ao balastro integrado e ao tamanho reduzido da lâmpada, as fluorescentes compactas integradas foram desenvolvidas principalmente para substituição directa das lâmpadas incandescentes e de halogéneo, com claros benefícios a nível de eficiência luminosa e economia energética [8], sem a necessidade de instalação de dispositivos adicionais como balastos e luminárias específicas. Na prática, para emitirem o mesmo fluxo luminoso de uma lâmpada incandescente, as lâmpadas fluorescentes compactas necessitam de uma potência activa bastante inferior. Para efeitos de comparação e substituição das incandescentes, a maioria dos fabricantes das lâmpadas fluorescentes compactas indica a potência equivalente de uma lâmpada incandescente que produz um fluxo luminoso comparável [10].

Desta forma, as lâmpadas fluorescentes compactas estão disponíveis com os tradicionais casquilhos de rosca como o E27 e o E14, assim com o casquilho de pinos GU10. A sua eficiência luminosa é de 50 a 70 lm/W, ligeiramente inferior à das lâmpadas fluorescentes tubulares, com um Índice de Restituição Cromática máximo de 85 [3] [8]. Em termos de tempo de vida médio e temperaturas de cor produzidas, as lâmpadas compactas fluorescentes apresentam valores semelhantes aos das lâmpadas fluorescentes tubulares.



Figura 2.4 – Lâmpada fluorescente compacta integrada de casquilho E27

A principal desvantagem deste tipo de lâmpadas é o facto de o fluxo luminoso nominal não ser atingido instantaneamente, mas apenas ao fim de alguns segundos ou até minutos [3]. Este facto torna-as pouco adequadas para utilização em locais com períodos curtos de utilização, isto é, com ciclos frequentes (ligar/desligar a lâmpada).

Os seus custos de produção e, conseqüentemente, de comercialização são também superiores aos outros tipos de lâmpadas abordadas anteriormente neste trabalho [3],

principalmente devido à inclusão do balastro electrónico no invólucro da lâmpada. Do ponto de vista eléctrico e tal como as fluorescentes tubulares, constituem cargas não lineares que provocam distorção harmónica.

Apesar das desvantagens, as lâmpadas compactas fluorescentes têm vindo a obter uma maior popularidade nos últimos anos, constituindo uma alternativa viável às menos eficientes lâmpadas incandescentes e de halogéneo. As restrições à comercialização das incandescentes têm também promovido a divulgação e a utilização das lâmpadas compactas fluorescentes, sendo que actualmente se encontram soluções de iluminação baseadas neste tipo de lâmpadas num grande número de edifícios.

2.2.5. Lâmpadas de LED (Díodos Emissores de Luz)

Um LED (*Light-Emitting Diode*), ou Díodo Emissor de Luz, é um dispositivo semicondutor com uma junção P-N, que quando polarizada directamente emite luz monocromática. O comprimento de onda, ou seja, a tonalidade da luz emitida está relacionado com o material utilizado no semicondutor, sendo que a combinação de vários materiais permite a emissão de luz de espectro visível com diferentes temperaturas de cor [6] [8].

Devido às suas propriedades de emissão de luz e dimensões reduzidas, os LED são já utilizados há várias décadas, embora apenas nos últimos anos tenham começado a surgir na forma de lâmpadas contendo vários LED, destinadas essencialmente à substituição de outros tipos de iluminação já existentes.

Como principais vantagens, as lâmpadas de LED têm um consumo energético muito reduzido e apresentam uma durabilidade elevada, sendo que nalguns casos o tempo de vida médio pode alcançar as 50000 h, o que representa um valor consideravelmente superior face a outros tipos de lâmpadas [3] [8]. O seu tempo de arranque é praticamente instantâneo e o tempo de vida não é afectado pelo número de ciclos de comutação realizados (ligar/desligar), constituindo uma solução viável para aplicações com ciclos frequentes.

Actualmente existem no mercado lâmpadas de LED com formatos de casquilho de rosca e de pinos, com temperaturas de cor entre os 3000 e 6000 K, Índice de Restituição Cromática de aproximadamente 70 a 90 e eficiência luminosa de 40 a 70 lm/W. [6] [8]

Na seguinte figura apresenta-se uma lâmpada de LED com casquilho GU10:



Figura 2.5 – Lâmpada de LED de casquilho GU10

Tal como as lâmpadas compactas fluorescentes, constituem cargas não lineares. Actualmente, o principal obstáculo à utilização de iluminação com recurso a LED está relacionado com os custos dispendiosos destes equipamentos [10]. Sendo uma tecnologia relativamente recente, em constante evolução e que apresenta vantagens claras, é expectável que no futuro a utilização de meios de iluminação com lâmpadas de LED apresente uma grande expansão [3] [8].

3. Caracterização das lâmpadas fluorescentes compactas

3.1. Características das lâmpadas a analisar nos ensaios experimentais

As lâmpadas utilizadas nos ensaios experimentais foram disponibilizadas pela marca OSRAM e as suas principais características serão descritas de seguida.



Figura 3.1 – Fotografia das embalagens comerciais de algumas lâmpadas OSRAM utilizadas nos ensaios experimentais

Para efeitos de identificação, foi atribuído um número de referência a cada lâmpada, conforme indicado na tabela 3.1. As lâmpadas numeradas de 1 a 8 são do tipo fluorescentes compactas integradas, sendo que as duas restantes, de referências 9 e 10, são lâmpadas de LED.

Assim sendo, a tabela seguinte contém a designação comercial das lâmpadas usadas, o formato do casquilho, a potência activa nominal indicada pelo fabricante, a potência equivalente para comparação com as lâmpadas incandescentes e ainda o factor de potência:

Tabela 3.1 – Características das lâmpadas a ensaiar

| Ref. | Modelo da lâmpada | Casquilho | P (W) | Pot. equiv. ^{a)} (W) | Factor de Potência, PF |
|------|--------------------------------|-----------|-------|-------------------------------|------------------------|
| 1 | DULUXSTAR MINI TWIST | E27 | 23 | 120 | 0,55 |
| 2 | DULUX INTELLIGENT SENSOR | E27 | 15 | 67 | 0,60 |
| 3 | DULUX EL LONGLIFE | E14 | 11 | 60 | - |
| 4 | DULUX SUPERSTAR CLASSIC A | E27 | 5 | 25 | - |
| 5 | DULUX EL LONGLIFE | E27 | 20 | 100 | - |
| 6 | DULUXSTAR | E14 | 8 | 40 | - |
| 7 | DULUXSTAR MINI BULLET T | E27 | 7 | 30 | - |
| 8 | DULUX EL ECONOMY | E27 | 8 | 40 | - |
| 9 | PARATHOM PAR16 | GU10 | 5 | 20 | ≥0,50 |
| 10 | PARATHOM PRO PAR16 50 ADVANCED | GU10 | 10 | 50 | ≥0,90 |

a) Potência equivalente de uma lâmpada incandescente que produz um fluxo luminoso comparável

Estas especificações foram retiradas da informação contida nas embalagens das lâmpadas, assim como em alguns catálogos de produtos da OSRAM. Devido ao facto de alguns destes equipamentos já terem sido descontinuados e/ou substituídos por novos modelos, algumas lâmpadas e/ou as suas especificações já não constam dos catálogos, de tal modo que algumas características se encontram em falta na tabela anterior. Face ao exposto, admite-se também a possibilidade de existirem pequenas incorrecções nos valores indicados.

Na tabela seguinte indicam-se os principais parâmetros luminotécnicos de cada lâmpada: fluxo luminoso emitido, temperatura de cor, índice de restituição cromática (IRC) e o tempo de vida médio em horas:

Tabela 3.2 – Parâmetros luminotécnicos das lâmpadas a ensaiar

| Ref. | Modelo da lâmpada | Fluxo luminoso (lm) | Temperatura de cor (K) | IRC | Tempo de vida médio (h) |
|------|--------------------------------|---------------------|------------------------|-----|-------------------------|
| 1 | DULUXSTAR MINI TWIST | 1550 | 4000 | 80 | 8000 |
| 2 | DULUX INTELLIGENT SENSOR | 850 | 2500 | 80 | 20000 |
| 3 | DULUX EL LONGLIFE | 660 | 2700 | 80 | 15000 |
| 4 | DULUX SUPERSTAR CLASSIC A | 150 | 2700 | 80 | - |
| 5 | DULUX EL LONGLIFE | 1000 | 2700 | 80 | 15000 |
| 6 | DULUXSTAR | 400 | 2700 | 80 | 10000 |
| 7 | DULUXSTAR MINI BULLET T | 300 | 2500 | 80 | 10000 |
| 8 | DULUX EL ECONOMY | 400 | 2700 | 80 | 8000 |
| 9 | PARATHOM PAR16 | 140 | 5000 | 70 | 15000 |
| 10 | PARATHOM PRO PAR16 50 ADVANCED | 350 | 3000 | 80 | 25000 |

Tal como na tabela 3.1, admite-se também a possibilidade da existência de valores incorrectos nos parâmetros luminotécnicos indicados na tabela 3.2.

3.2. Normalização Internacional sobre a Compatibilidade Electromagnética

A Comissão Electrotécnica Internacional (*IEC – International Electrotechnical Commission*) é uma organização internacional criada com o objectivo de estabelecer normas internacionais no âmbito da electrotecnia. Neste subcapítulo abordam-se as principais normas estabelecidas pela IEC relevantes para este trabalho, ou seja, as normas aplicáveis sobre a compatibilidade electromagnética para dispositivos de iluminação e sobre os procedimentos de medição associados.

3.2.1. Norma IEC 61000-3-2

A norma IEC 61000-3-2 [2], designada por Norma da Compatibilidade Electromagnética (EMC) (*Electromagnetic compatibility – Limits for harmonic current emissions: equipment input current $\leq 16 A$ per phase*), estabelece limites para as componentes harmónicas de corrente produzidas por diversos equipamentos com o objectivo de limitar a injeção de conteúdo harmónico na rede eléctrica.

Esta norma aplica-se a equipamento eléctrico e electrónico susceptível de ser ligado à rede de distribuição eléctrica em baixa tensão cuja corrente nominal não exceda 16 A por fase.

Entre os vários tipos de equipamento abrangidos por esta norma destacam-se os equipamentos de iluminação. Segundo este documento normativo, definem-se por equipamentos de iluminação todos aqueles cuja principal função consista na criação, regulação e/ou emissão de radiação óptica artificial através de lâmpadas incandescentes, lâmpadas de descarga ou lâmpadas de díodos emissores de luz (LED - *light-emitting diode*).

A norma IEC 61000-3-2 estabelece diferentes limites para as correntes harmónicas em função da classificação do tipo de equipamento em análise. Os equipamentos de iluminação descritos no parágrafo anterior são classificados como pertencentes à Classe C.

Dentro da Classe C, os equipamentos de iluminação subdividem-se conforme a sua potência activa P . As lâmpadas de descarga em estudo neste trabalho enquadram-se na subcategoria dos equipamentos de iluminação de potência activa inferior ou igual a 25 W. Desta forma, estes equipamentos terão de cumprir um dos seguintes conjuntos de requisitos:

- 1) Primeiro conjunto de requisitos referente aos limites de corrente das harmónicas ímpares;
- 2) Segundo conjunto de requisitos referente à forma de onda da corrente e à 3^a e 5^a harmónicas.

Nos subcapítulos seguintes serão abordados estes requisitos.

3.2.1.1. Primeiro conjunto de requisitos referente aos limites de corrente das harmónicas ímpares

O primeiro conjunto de regras a cumprir relaciona-se com limites de corrente para cada harmónica ímpar até à 40.^a ordem. Apesar de os equipamentos de iluminação anteriormente descritos pertencerem à Classe C, os limites aplicáveis são dados pelas tabelas relativas aos equipamentos das Classes D e A.

Desta forma, segundo a norma IEC 61000-3-2 as correntes harmónicas não devem exceder os limites relativos à potência activa estipulados para equipamentos da Classe D.

De seguida apresenta-se a tabela 3.3, a qual indica os limites para os equipamentos de Classe D:

Tabela 3.3 – Limites harmónicos de corrente para equipamentos de Classe D

| Ordem da harmónica, n | Corrente máxima por Watt (mA/W) | Corrente máxima permitida (A) |
|--|---------------------------------|--|
| 3 | 3,4 | 2,30 |
| 5 | 1,9 | 1,14 |
| 7 | 1,0 | 0,77 |
| 9 | 0,5 | 0,40 |
| 11 | 0,35 | 0,33 |
| $13 \leq n \leq 39$ (apenas harmónicas ímpares) | $3,85/n$ | Consultar tabela 3.4 – equip. Classe A |

Como se pode constatar na tabela 3.3, os limites harmónicos de corrente são estabelecidos apenas para harmónicas ímpares em função da potência activa do equipamento em teste, existindo também um valor absoluto de corrente que não pode ser excedido. De forma a conhecer a corrente máxima permitida para harmónicas ímpares de ordem $13 \leq n \leq 39$, segundo a norma IEC 61000-3-2 é necessário consultar os limites harmónicos de corrente para equipamentos de Classe A, indicados na tabela 3.4:

Tabela 3.4 – Limites harmónicos de corrente para equipamentos de Classe A

| Ordem da harmónica, n | Corrente máxima permitida (A) |
|---------------------------|-------------------------------|
| Harmónicas ímpares | |
| 3 | 2,30 |
| 5 | 1,14 |
| 7 | 0,77 |
| 9 | 0,40 |
| 11 | 0,33 |
| 13 | 0,21 |
| $15 \leq n \leq 39$ | $0,15 \times 15/n$ |
| Harmónicas pares | |
| 2 | 1,08 |
| 4 | 0,43 |
| 6 | 0,30 |
| $8 \leq n \leq 40$ | $0,23 \times 8/n$ |

Na tabela 3.4 devem apenas considerar-se os limites de corrente referentes às harmónicas ímpares de ordem $13 \leq n \leq 39$, sendo os limites das restantes harmónicas ímpares indicados na tabela 3.3. Para facilitar a compreensão dos limites e de forma a minimizar possíveis erros de interpretação, será elaborada uma tabela que reúne os limites harmónicos de corrente para equipamentos de Classe C de potência activa inferior ou igual a 25 W, que condensa a informação referente às tabelas 3.3 e 3.4:

Tabela 3.5 – Primeiro conjunto de requisitos referente aos limites de corrente das harmónicas ímpares

| Ordem da harmónica, n | Corrente máxima por Watt (mA/W) | Corrente máxima permitida (A) |
|--|--|--------------------------------------|
| 3 | 3,4 | 2,30 |
| 5 | 1,9 | 1,14 |
| 7 | 1,0 | 0,77 |
| 9 | 0,5 | 0,40 |
| 11 | 0,35 | 0,33 |
| 13 | $3,85/n$ | 0,21 |
| $15 \leq n \leq 39$ (apenas harmónicas ímpares) | $3,85/n$ | $0,15 \times 15/n$ |

Esta tabela indica os limites harmónicos de corrente definidos pelo primeiro conjunto de requisitos.

3.2.1.2. Segundo conjunto de requisitos referente à forma de onda da corrente e à 3^a e 5^a harmónicas

O segundo conjunto de regras estipula parâmetros para a forma de onda da corrente a cumprir pelos equipamentos em teste, assim como limites de corrente para a 3^a e 5^a harmónicas.

A figura seguinte, retirada da norma IEC 61000-3-2, ilustra os parâmetros requeridos em termos de forma de onda:

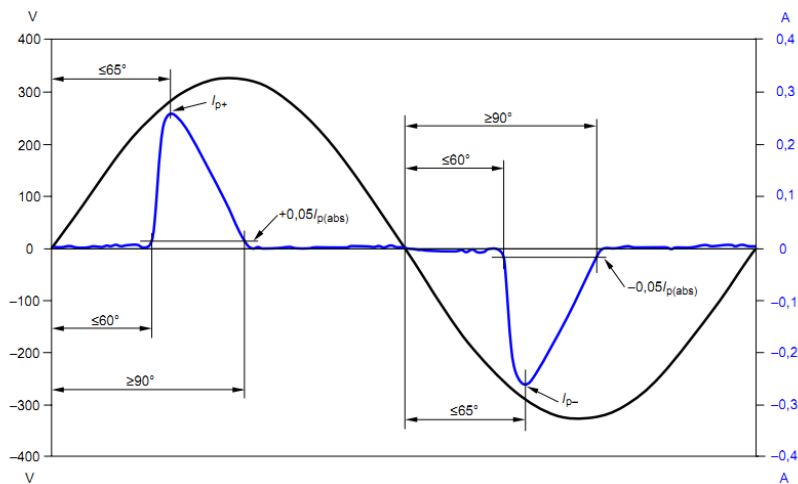


Figura 3.2 – Parâmetros de corrente e de ângulo de fase a cumprir pelos equipamentos de Classe C

Na figura anterior, a forma de onda a preto representa a tensão e a forma de onda a azul é a corrente.

I_{p+} e I_{p-} representam os valores de pico da corrente nas alternâncias positiva e negativa, respectivamente, da forma de onda da corrente obtida durante a medição. $I_{p(abs)}$ é o maior valor em módulo entre o par de valores I_{p+} e I_{p-} .

Existe ainda um limiar de 5% de $I_{p(abs)}$, representado na figura por $+0,05I_{p(abs)}$ e $-0,05I_{p(abs)}$ para as alternâncias positiva e negativa, respectivamente.

Assim sendo, na alternância positiva a evolução da corrente tem de ser tal que:

- atinja $+0,05I_{p(abs)}$ num ângulo até 60° , inclusive;
- atinja I_{p+} num ângulo até 65° , inclusive;
- atinja $+0,05I_{p(abs)}$ num ângulo igual ou superior a 90° .

De forma análoga, na alternância negativa a forma de onda da corrente tem de ser tal que:

- atinja $-0,05I_{p(abs)}$ num ângulo até 60° , inclusive;
- atinja I_{p-} num ângulo até 65° , inclusive;
- atinja $-0,05I_{p(abs)}$ num ângulo igual ou superior a 90° .

Estes valores de ângulos são medidos a partir de uma qualquer passagem por zero da forma de onda da tensão, sendo que um período completo representa um ângulo de 360°.

Para finalizar, além do cumprimento dos parâmetros descritos e ilustrados na figura 3.2, a 3ª e 5ª harmônicas de corrente, I_{3h} e I_{5h} , expressas em percentagens da componente fundamental, não devem exceder, respectivamente, 86% e 61% da componente fundamental, I_{1h} .

Em resumo, a tabela seguinte reúne todos os requisitos deste segundo conjunto de regras:

Tabela 3.6 – Segundo conjunto de requisitos referente à forma de onda da corrente e à 3ª e 5ª harmônicas

| Regras a cumprir |
|---|
| $I_{3h} \leq 86\% \text{ de } I_{1h}$ |
| $I_{5h} \leq 61\% \text{ de } I_{1h}$ |
| $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\leq 60^\circ$ |
| I_{p+} e I_{p-} ocorrem $\leq 65^\circ$ |
| $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\geq 90^\circ$ |

Salienta-se novamente que não é obrigatório que os equipamentos cumpram ambos os conjuntos de regras presentes nas tabelas 3.5 e 3.6, ou seja, apenas é necessário o cumprimento de um deles.

3.2.2. Considerações e outras normas relevantes

Segundo o Anexo C da norma IEC 61000-3-2, as lâmpadas de descarga devem ser ligadas pelo menos 15 min antes da realização de qualquer medição [2].

O Anexo A da norma IEC 61000-3-2 define que a tensão aplicada aos terminais do equipamento em teste deve corresponder à tensão nominal do equipamento. Tratando-se de equipamentos monofásicos, a tensão eficaz deverá ser de 230 V. Esta tensão deverá ter um desvio máximo de $\pm 2,0\%$ relativo ao valor nominal, assim como a frequência da tensão se deverá manter dentro de $\pm 0,5\%$ do valor nominal.

No entanto, as lâmpadas a ensaiar serão ligadas directamente à rede de distribuição de energia e poderá não ser possível cumprir os requisitos do parágrafo anterior. Conforme abordado na Norma Portuguesa NP EN 50160:2001, referente às Características da Tensão Fornecida pelas Redes de Distribuição Pública de Energia Eléctrica, é referido que a electricidade é uma forma de energia que apresenta características variáveis. A própria utilização da electricidade influencia a variação das suas características, além de outros inúmeros factores. Desta forma, na prática nem sempre se torna possível manter a qualidade da tensão da rede eléctrica, nomeadamente as suas características de amplitude, frequência e conteúdo harmónico [11].

Foi tomada em conta a Norma IEC 61000-4-7, designada por Norma da Compatibilidade Electromagnética (EMC) – Técnicas de Teste e Medição (*Electromagnetic compatibility – Testing and measurement techniques*) [1], referente a instrumentação para ensaios de equipamento com vista à verificação da conformidade com outras normas, tais como os limites harmónicos de corrente já abordados na norma IEC 61000-3-2.

Segundo a norma IEC 61000-4-7, as diferentes características dos sinais impõem alguns requisitos. Sendo o objectivo deste trabalho a medição de tensões e correntes harmónicas em equipamentos de iluminação, os sinais a medir podem-se considerar sinais com harmónicas quase estacionárias (*quasi-stationary harmonics*).

A norma IEC 61000-4-7 divide os métodos de medição em instrumentação no domínio do tempo e em instrumentação no domínio da frequência. Neste trabalho recorrer-se-á ao método de instrumentação no domínio do tempo (*time-domain instrumentation*), que se define por instrumentação que realiza a análise dos sinais por amostragem temporal e subsequente processamento dos dados adquiridos. A transformada rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) é o algoritmo computacional mais utilizado para efeitos de análise harmónica.

Então, de acordo com a norma IEC 61000-4-7, para instrumentação no domínio do tempo recorrendo à FFT para análise de sinais com harmónicas quase estacionárias, é recomendado um intervalo temporal de medição entre 0,1 e 0,5 s. No presente trabalho optou-se por um intervalo temporal de 0,1 s, correspondente 5 períodos completos da frequência fundamental.

A norma IEC 61000-4-7 refere ainda que, antes do processamento via FFT, as amostras da janela temporal podem assumir diferentes pesos através da aplicação de uma função especial (“*window shape*”). Desta forma, é recomendada uma janela do tipo rectangular, a qual atribui pesos iguais a todas as amostras.

3.3. Circuito-tipo utilizado nas lâmpadas fluorescentes compactas

Conforme já referido neste trabalho, as lâmpadas fluorescentes compactas integradas possuem um balastro integrado na base da lâmpada. A seguinte figura ilustra um esquema eléctrico típico das lâmpadas fluorescentes compactas, ou seja, o balastro:

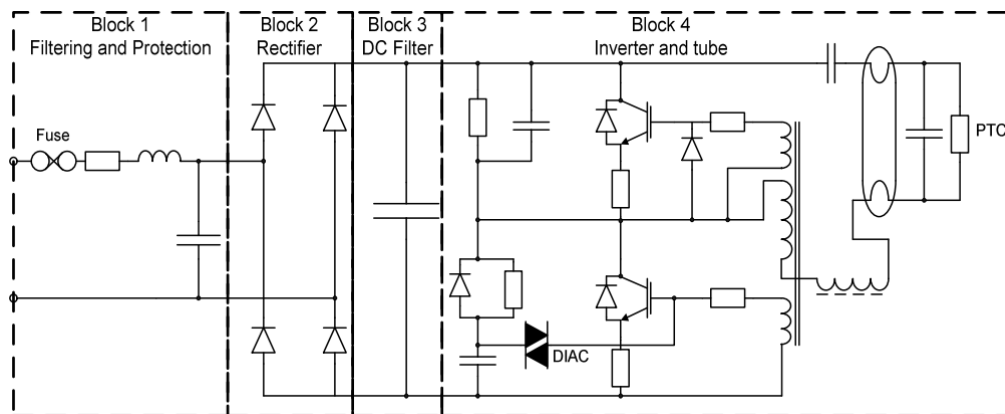


Figura 3.3 – Esquema eléctrico de uma lâmpada fluorescente compacta [12]

Na figura acima, o esquema eléctrico encontra-se dividido em blocos. O primeiro bloco (*Block 1*) representa os terminais de fase e neutro para ligação à rede eléctrica, incluindo os componentes necessários à protecção, filtragem e limitação de picos de corrente.

No segundo bloco (*Block 2*) encontra-se um rectificador monofásico de onda completa em ponte não controlado, o qual realiza a conversão da tensão alternada da rede para corrente contínua. O terceiro bloco (*Block 3*) contém um condensador de filtragem que fornece a tensão de entrada para o conversor ressonante presente no quarto bloco (*Block 4*). O conversor ressonante é o responsável pelo arranque do tubo de descarga da lâmpada [12].

Este conversor ressonante opera a uma frequência elevada, tipicamente entre 10 e 40 kHz, e é visto como uma carga constante que está presente no lado contínuo do rectificador. Desta forma, para a análise harmónica das correntes do rectificador, o conversor e o tubo de descarga do bloco 4 podem ser representados apenas por uma resistência [12].

Assim sendo, o circuito eléctrico utilizado nas lâmpadas fluorescentes compactas pode ser caracterizado apenas pelos três primeiros blocos da figura 3.3. Por outras palavras, considera-se que um circuito com um rectificador monofásico em ponte não controlado com uma carga capacitiva (ver figura 3.4) é adequado para o estudo das correntes de uma lâmpada compacta fluorescente, sendo que os parâmetros da carga capacitiva, R e C , dependem essencialmente da potência activa da lâmpada em questão. Salienta-se ainda que as lâmpadas de LED também podem utilizar um circuito deste tipo.

Pretende-se agora caracterizar as expressões que definem as correntes no lado alternado e no lado contínuo do rectificador monofásico em ponte, em função dos parâmetros da carga capacitiva (RC). Será realizada uma aproximação para a determinação destes parâmetros, assim como será definida uma equação que permita identificar o ponto de início de condução do rectificador.

Posteriormente, será efectuada a decomposição em série de Fourier das correntes no lado alternado e no lado contínuo do rectificador, para efeitos de análise do seu conteúdo harmónico. Este último ponto tem como objectivo prever as componentes harmónicas de uma dada lâmpada compacta fluorescente através da sua potência, ou seja, apenas a partir do valor resistência equivalente que representa o inversor ressonante e do valor do condensador de filtragem já descritos.

3.3.1. Análise das correntes do rectificador monofásico em ponte não controlado com carga capacitiva

Na figura 3.4 apresenta-se o circuito do rectificador monofásico em ponte não controlado com carga capacitiva (RC):

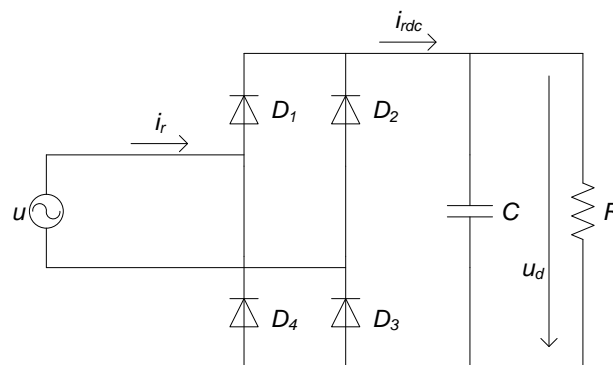


Figura 3.4 – Rectificador monofásico em ponte não controlado com carga capacitiva

A tensão u aplicada ao lado alternado do retificador é dada por:

$$u = \sqrt{2} U \text{sen}(\omega t) \quad (3.1)$$

Desprezando as perdas nos díodos do retificador, a corrente i_{rdc} no lado contínuo do retificador pode ser caracterizada pela seguinte expressão,

$$i_{rdc} = \frac{\sqrt{2} U}{Z} \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (3.2)$$

sendo a equação (3.2) válida enquanto $i_{rdc} > 0$. A corrente i_{rdc} anula-se quando $\omega t = \pi - \phi$.

Os coeficientes ϕ e Z presentes em (2) são dados por:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{(1/R)^2 + (\omega C)^2}} \quad (3.3)$$

$$\phi = \tan^{-1}(\omega RC) \quad (3.4)$$

Na alternância positiva da tensão de alimentação u , os díodos D_1 e D_3 conduzem e a tensão u_d na carga RC é definida pela seguinte equação:

$$u_d = u_c = u_r = \sqrt{2} U \text{sen}(\omega t) \quad (3.5)$$

Quando i_{rdc} se anula, D_1 e D_3 deixam de conduzir e D_2 e D_4 ainda estão inversamente polarizados. Assim sendo, no ponto onde i_{rdc} se anula, correspondente a $\omega t = \pi - \phi$, a tensão no condensador é dada por:

$$u_c = \sqrt{2} U \text{sen}(\pi - \phi) = \sqrt{2} U \text{sen}(\phi) \quad (3.6)$$

A partir do instante de anulamento da corrente i_{rdc} , o condensador descarrega-se livremente na malha RC, sendo a tensão u_c uma exponencial decrescente definida por:

$$u_c = u_d = A e^{-\frac{1}{RC}\left(t - \frac{\pi - \phi}{\omega}\right)} \quad (3.7)$$

Em $t = \frac{\pi-\phi}{\omega}$, $u_c = \sqrt{2} U \text{sen}(\phi) \Rightarrow A$, logo tem-se,

$$u_c = u_d = \sqrt{2} U \text{sen}(\phi) e^{-\frac{1}{RC}\left(t-\frac{\pi-\phi}{\omega}\right)} \quad (3.8)$$

sendo a equação (3.8) válida enquanto não há díodos à condução.

Na alternância negativa da tensão u , os díodos D_2 e D_4 entram à condução assim que $-u$ se torna maior que u_c . O instante em que isto ocorre pode ser determinado resolvendo a seguinte equação:

$$\sqrt{2} U \text{sen}(\phi) e^{-\frac{1}{RC}\left(t-\frac{\pi-\phi}{\omega}\right)} = \sqrt{2} U \text{sen}(\omega t) \quad (3.9)$$

Esta equação (3.9) surge igualando a expressão (3.1) da tensão u à expressão (3.8) da tensão u_c , podendo ser também simplificada para a seguinte forma, onde β corresponde ao ponto de início de condução:

$$\text{sen}(\phi) e^{-\frac{1}{\tan\phi}(\beta+\phi)} = \text{sen}(\beta) \quad (3.10)$$

A equação (3.10) é uma equação transcendental e a sua resolução pode ser obtida recorrendo a ferramentas computacionais de cálculo numérico. A determinação de uma expressão que defina β em função de ϕ permite conhecer o ponto de início de condução, isto é, o ponto onde $i_{rdc} > 0$.

Desta forma, a corrente no lado contínuo do rectificador é definida pela expressão (3.2) enunciada anteriormente e que é válida no intervalo $\beta < \omega t < \pi - \phi$, ou seja, durante a alternância positiva de u .

Devido à rectificação da corrente no lado alternado do rectificador, a corrente i_{rdc} do lado contínuo também está definida na alternância negativa de u , correspondente ao intervalo $\pi + \beta < \omega t < 2\pi - \phi$. Assim sendo, a corrente i_{rdc} em função de ωt é dada por:

$$i_{rdc}(\omega t) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \text{sen}(\omega t + \phi), & \beta < \omega t < \pi - \phi \\ -\frac{\sqrt{2} U}{Z} \text{sen}(\omega t + \phi), & \pi + \beta < \omega t < 2\pi - \phi \\ 0, & \text{restantes intervalos} \end{cases} \quad (3.11)$$

Conhecendo a expressão da corrente i_{rdc} do lado contínuo do rectificador, é possível escrever a expressão que define a corrente i_r no lado alternado do rectificador:

$$i_r(\omega t) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \text{sen}(\omega t + \phi), & \beta < \omega t < \pi - \phi \\ \frac{\sqrt{2} U}{Z} \text{sen}(\omega t + \phi), & \pi + \beta < \omega t < 2\pi - \phi \\ 0, & \text{restantes intervalos} \end{cases} \quad (3.12)$$

3.3.2. Aproximação para determinação dos parâmetros da carga do rectificador

Pretende-se agora representar graficamente as formas de onda obtidas através das expressões (3.11) e (3.12). Para tal, é necessário determinar os parâmetros R e C já descritos anteriormente, correspondentes à carga capacitiva do rectificador monofásico em ponte. Estes parâmetros são indispensáveis para a obtenção dos coeficientes ϕ e Z .

Desta forma, o objectivo será determinar teoricamente os parâmetros R e C que representam uma dada lâmpada, conhecendo apenas a sua potência activa P . Será necessário realizar uma aproximação, indicada nas páginas seguintes, para a obtenção destes parâmetros R e C .

Na figura seguinte, a azul encontra-se a forma de onda da tensão no lado contínuo do retificador, a qual corresponde apenas à rectificação da tensão aplicada no lado alternado, assim como a tensão no condensador indicada a encarnado:

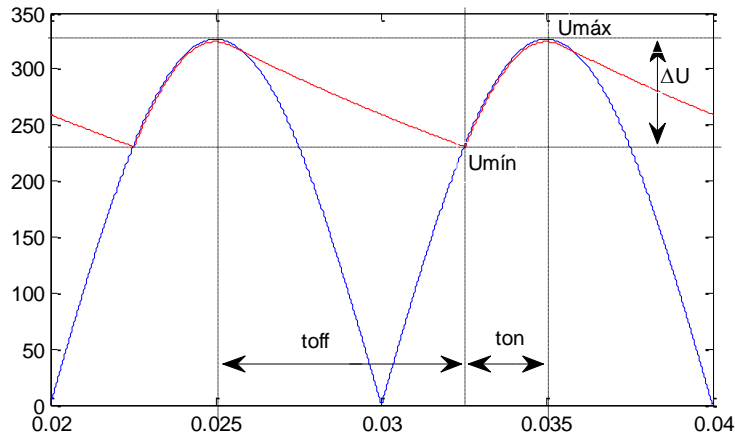


Figura 3.5 – Exemplo da evolução da tensão no condensador

Durante o tempo t_{on} , o rectificador encontra-se à condução e o condensador é carregado. Já durante o tempo t_{off} , o rectificador não conduz e o condensador descarrega-se na malha RC.

A equação (3.8), descrita anteriormente, expressa a tensão no condensador durante a sua descarga, a qual possui uma forma exponencial decrescente. Neste subcapítulo será considerada uma aproximação, ou seja, considera-se que a tensão no condensador decresce de forma linear durante o intervalo de tempo t_{off} .

Assim sendo, a corrente num condensador é dada pela seguinte equação,

$$i_c = C \frac{du}{dt} \quad (3.13)$$

Onde C é capacidade do condensador em farad e du/dt a taxa de variação da tensão aos seus terminais. Considerando então a aproximação linear, a equação anterior será dada por:

$$I_c \cong C \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad (3.14)$$

Deduzindo a expressão anterior em ordem ao condensador, tem-se:

$$C \cong I_c \frac{\Delta t}{\Delta U} \quad (3.15)$$

Considerando que a corrente eficaz no condensador é igual à corrente eficaz na resistência, através da lei de Ohm a corrente eficaz no condensador vem expressa por:

$$I_c \cong \frac{U_{rms}}{R} \quad (3.16)$$

Conforme representado na figura 3.5 e na equação (3.15), o parâmetro ΔU corresponde à variação da tensão no condensador, isto é, o *ripple*, que é dado pela diferença entre as tensões máxima e mínima, $U_{m\acute{a}x}$ e $U_{m\acute{i}n}$:

$$\Delta U = U_{m\acute{a}x} - U_{m\acute{i}n} \quad (3.17)$$

Alternativamente, o *ripple* também pode ser expresso em percentagem por:

$$\Delta U (\%) = \frac{U_{m\acute{a}x} - U_{m\acute{i}n}}{U_{m\acute{a}x}} \times 100 \quad (3.18)$$

Já a tensão média no condensador, $U_{m\acute{e}d}$, é definida como sendo a diferença entre o valor máximo de tensão e metade do *ripple*:

$$U_{m\acute{e}d} = U_{m\acute{a}x} - \frac{\Delta U}{2} \quad (3.19)$$

Conhecendo a potência activa nominal e sabendo que a tensão eficaz no condensador é igual à tensão eficaz na resistência, o valor da resistência equivalente poderá ser determinado por:

$$R \cong \frac{U_{rms}^2}{P} \quad (3.20)$$

De acordo com a equação (3.5), durante a alternância positiva da tensão, a tensão no lado contínuo do rectificador é dada por:

$$u_d = u_c = u_r = \sqrt{2} U \text{sen}(\omega t) \quad (3.5)$$

Assim sendo, e tendo em conta que $\sqrt{2} U = U_{m\acute{a}x}$, o valor mínimo da tensão $U_{m\acute{i}n}$ visível na figura 3.5 é expresso por:

$$U_{m\acute{i}n} = U_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t_{on}) \quad (3.21)$$

Se se conhecerem os valores de $U_{m\acute{i}n}$, de $U_{m\acute{a}x}$ e de ω , o tempo de conduao t_{on} pode ser expresso por:

$$t_{on} = \frac{\text{sen}^{-1}\left(\frac{U_{m\acute{i}n}}{U_{m\acute{a}x}}\right)}{\omega} \quad (3.22)$$

Assim sendo, o tempo t_{off} é dado por,

$$t_{off} = \frac{T}{2} - t_{on} \quad (3.23)$$

onde o período T corresponde a um período da tensão no lado alternado do rectificador. Devido à rectificaao, as formas de onda da figura 3.5 apresentam uma frequência dupla da frequência da tensão no lado alternado, ou seja, o seu período é reduzido para metade.

Finalmente, a equaao (3.15) pode ser reescrita da seguinte forma,

$$C \cong \frac{U_{rms}}{R} \frac{t_{off}}{\Delta U} \quad (3.24)$$

considerando que a tensão no condensador decresce ΔU durante o tempo t_{off} .

Em resumo, a aproximaao considerada permite obter os parâmetros R e C através das equaoes (3.20) e (3.24), respectivamente.

Pretende-se agora representar as formas de onda de cada uma das i_{rdc} e i_r , segundo (3.11) e (3.12), para uma lâmpada fluorescente compacta de potência activa $P = 20$ W. Admitiu-se que o *ripple* da tensão no seu lado contínuo, ΔU , é de 30 %.

Definem-se os seguintes parâmetros: $U = 230$ V; $f = 50$ Hz ($\omega = 314$ rad/s). Segundo a aproximação efectuada e de acordo com as equações anteriores, obtém-se:

$$U_{m\acute{a}x} = 325,27 \text{ V}; \quad U_{m\acute{i}n} = 227,69 \text{ V};$$
$$\Delta U = 97,58 \text{ V}; \quad U_{m\acute{e}d} = 276,48 \text{ V};$$

$$t_{on} = 2,5 \text{ ms}; \quad t_{off} = 7,5 \text{ ms};$$
$$R = 3822 \text{ } \Omega; \quad C = 5,6 \text{ } \mu\text{F};$$

De acordo com as expressões (3.3) e (3.4), tem-se: $Z = 562,23 \text{ } \Omega$ e $\phi = 1,4232$ rad. Resolvendo a equação (3.10), tem-se $\beta = 0,8068$ rad.

De seguida apresentam-se as formas de onda das correntes i_{rdc} e i_r obtidas através das equações (3.11) e (3.12). No gráfico encontram-se assinalados os pontos de início e de fim de condução do rectificador.

Para efeitos de comparação, serão também incluídos os resultados de uma simulação de um rectificador monofásico em ponte com carga capacitiva com exactamente os mesmos parâmetros, realizada através da biblioteca *SimPowerSystems* do MATLAB/Simulink. Os detalhes da simulação encontram-se no Anexo 1.

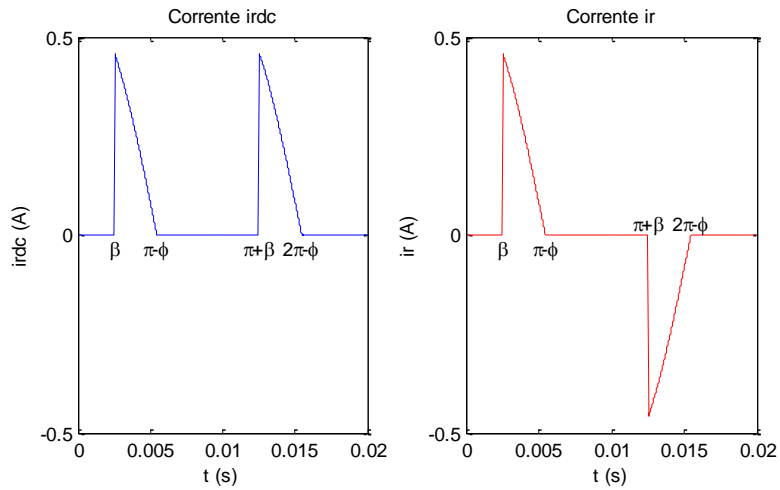


Figura 3.6 – Períodos das correntes i_{rdc} e i_r obtidas através das expressões teóricas para uma lâmpada de 20 W

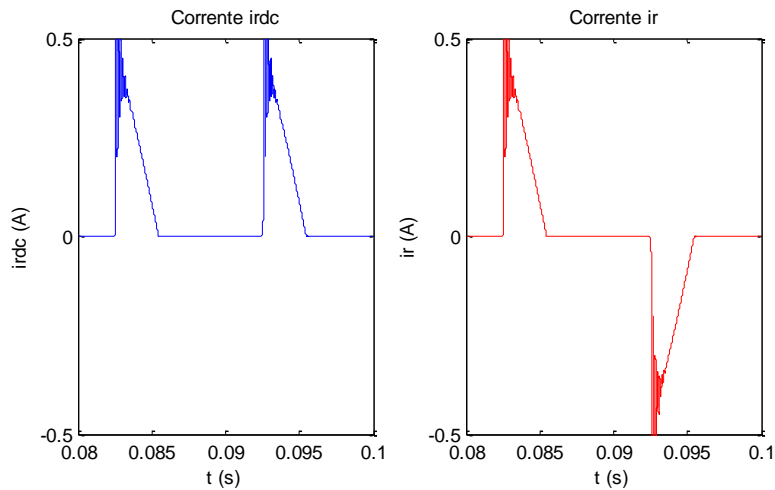


Figura 3.7 – Períodos das correntes i_{rdc} e i_r obtidas através de simulação para uma lâmpada de 20 W

Apesar de existir alguma oscilação nas formas de onda obtidas por simulação, estas são bastante similares às formas de onda baseadas nas expressões teóricas e os intervalos temporais de condução são iguais.

Através da simulação retiraram-se ainda os valores da tensão no lado contínuo do retificador, os quais são semelhantes aos valores previstos teoricamente:

$$\begin{aligned}
 U_{máx} &= 325,27 \text{ V}; & U_{mín} &= 230,66 \text{ V}; \\
 \Delta U &= 94,61 \text{ V}; & U_{méd} &= 282,14 \text{ V};
 \end{aligned}$$

Na figura seguinte representa-se a tensão aplicada no lado alternado do rectificador, u , assim como a tensão e_{rdc} no lado contínuo do rectificador, a qual é igual à tensão no condensador. Na figura, é visível o ciclo de carga e descarga do condensador, tal como evidenciado anteriormente na figura 3.5:

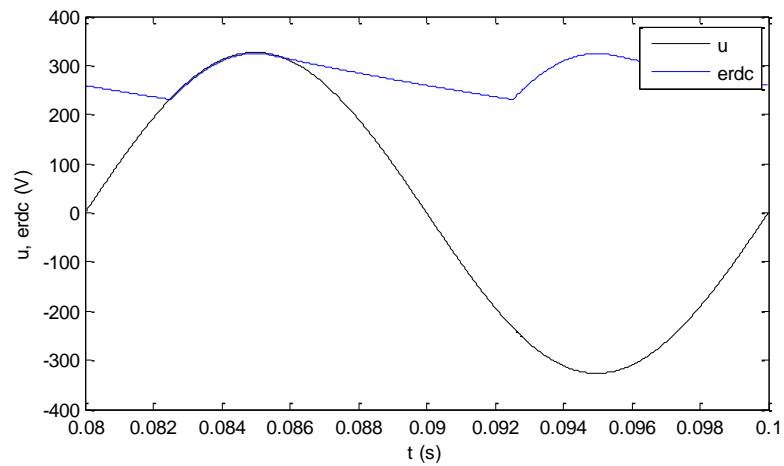


Figura 3.8 – Tensões no lado alternado e no lado contínuo do rectificador obtidas através de simulação

3.3.3. Determinação de uma expressão para a identificação do ponto de início de condução do rectificador

Conforme descrito anteriormente, a equação (3.10) relaciona os ângulos β e ϕ :

$$\text{sen}(\phi) e^{-\frac{1}{\tan \phi}(\beta+\phi)} = \text{sen}(\beta) \quad (3.10)$$

Sendo β o ângulo de início de condução do rectificador, pretende-se determinar uma expressão que defina β em função do parâmetro ϕ , já previamente conhecido e expresso pela equação (3.4).

A resolução da equação transcendental (3.10) pode ser obtida recorrendo a ferramentas computacionais de cálculo numérico. Desta forma, recorrendo ao programa MATLAB/Simulink atribuíram-se valores de 1 a 89° ao ângulo ϕ e, para cada um destes valores, resolveu-se a equação (3.10) em ordem a β através do comando *solve*.

Na tabela 3.7 da página seguinte apresentam-se os resultados, isto é, os valores de ϕ considerados e os valores de β resultantes do processo de cálculo numérico. A representação gráfica destes pares de valores encontra-se na figura 3.9.

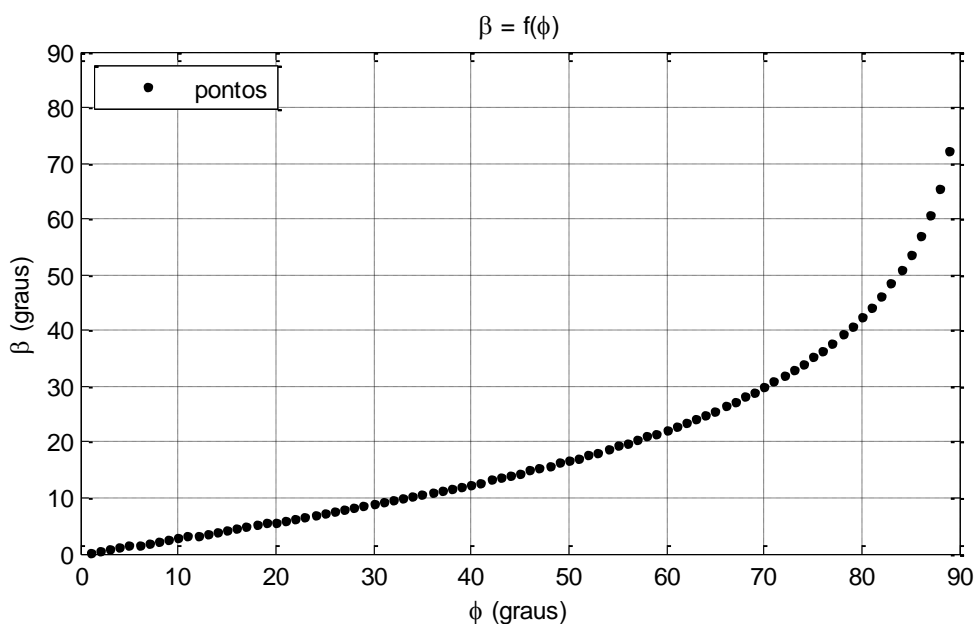


Figura 3.9 – Valores de ϕ e β obtidos através cálculo em MATLAB

Tabela 3.7 – Valores de ϕ e β obtidos através de cálculo em MATLAB

| Φ (°) | β (°) | Φ (°) | β (°) | Φ (°) | β (°) |
|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
| 1 | 0,28 | 31 | 9,22 | 61 | 22,86 |
| 2 | 0,56 | 32 | 9,56 | 62 | 23,53 |
| 3 | 0,84 | 33 | 9,90 | 63 | 24,22 |
| 4 | 1,12 | 34 | 10,25 | 64 | 24,93 |
| 5 | 1,39 | 35 | 10,61 | 65 | 25,68 |
| 6 | 1,67 | 36 | 10,97 | 66 | 26,45 |
| 7 | 1,96 | 37 | 11,33 | 67 | 27,25 |
| 8 | 2,24 | 38 | 11,70 | 68 | 28,09 |
| 9 | 2,52 | 39 | 12,08 | 69 | 28,97 |
| 10 | 2,80 | 40 | 12,46 | 70 | 29,88 |
| 11 | 3,09 | 41 | 12,86 | 71 | 30,84 |
| 12 | 3,37 | 42 | 13,25 | 72 | 31,85 |
| 13 | 3,66 | 43 | 13,66 | 73 | 32,92 |
| 14 | 3,95 | 44 | 14,07 | 74 | 34,04 |
| 15 | 4,24 | 45 | 14,50 | 75 | 35,23 |
| 16 | 4,53 | 46 | 14,93 | 76 | 36,49 |
| 17 | 4,82 | 47 | 15,37 | 77 | 37,84 |
| 18 | 5,12 | 48 | 15,82 | 78 | 39,28 |
| 19 | 5,42 | 49 | 16,28 | 79 | 40,82 |
| 20 | 5,72 | 50 | 16,75 | 80 | 42,49 |
| 21 | 6,02 | 51 | 17,23 | 81 | 44,31 |
| 22 | 6,33 | 52 | 17,73 | 82 | 46,30 |
| 23 | 6,63 | 53 | 18,24 | 83 | 48,49 |
| 24 | 6,94 | 54 | 18,76 | 84 | 50,94 |
| 25 | 7,26 | 55 | 19,29 | 85 | 53,71 |
| 26 | 7,58 | 56 | 19,84 | 86 | 56,92 |
| 27 | 7,90 | 57 | 20,41 | 87 | 60,74 |
| 28 | 8,22 | 58 | 21,00 | 88 | 65,52 |
| 29 | 8,55 | 59 | 21,60 | 89 | 72,16 |
| 30 | 8,88 | 60 | 22,22 | | |

Através de regressão polinomial pretende-se encontrar uma expressão que se ajuste aos valores obtidos na tabela 3.7, de forma a que exista uma função de ϕ que devolva o valor de β .

Desta forma, para descrever uma função do tipo $\beta = f(\phi)$ obteve-se o seguinte polinómio de 5ª ordem:

$$\begin{aligned} \beta = & (1,135790 \times 10^{-7}) \phi^5 - (2,106445 \times 10^{-5}) \phi^4 + \\ & + (1,439217 \times 10^{-3}) \phi^3 - (4,063208 \times 10^{-2}) \phi^2 + \\ & + (0,7247827) \phi - 1,202496 \end{aligned} \quad (3.25)$$

De seguida apresenta-se um gráfico do polinómio de regressão obtido, assim como os pontos já mostrados na figura 3.9:

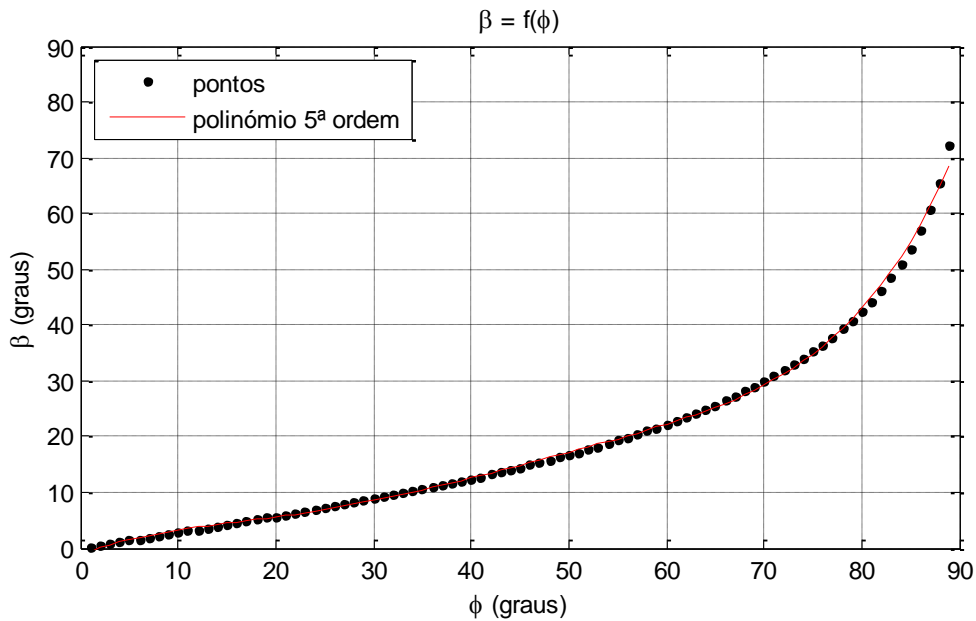


Figura 3.10 – Valores de ϕ e β obtidos e polinómio de regressão

Verifica-se que o polinómio de regressão se ajusta satisfatoriamente aos pontos da tabela 3.7, o que também se explica pelo seu coeficiente de determinação $R^2 = 0,9987$, relativamente próximo do valor ideal de 1.

Graficamente, é visível que a diferença entre os pontos calculados e o polinómio de regressão é reduzida, à excepção do último valor correspondente a $\phi = 89^\circ$. O desvio-padrão desta diferença entre os pontos calculados e o polinómio de regressão corresponde a $0,5954^\circ$.

Assim sendo, conclui-se que o polinómio obtido em (3.25) é adequado para a obtenção do parâmetro β em função de ϕ , ou seja, para conhecer o ponto de início de condução do rectificador a partir das características da carga RC, representadas pelo parâmetro ϕ .

Desta forma, a utilidade do polinómio obtido consiste em obter o ponto de início de condução de qualquer rectificador em ponte não controlado com carga capacitiva, apenas pela introdução da variável independente ϕ , a qual traduz o tipo de carga RC presente.

3.3.4. Análise de Fourier das correntes do rectificador

O rectificador monofásico em ponte não controlado com carga RC, cujas expressões de correntes no lado alternado e no lado contínuo foram caracterizadas anteriormente, consiste numa carga não linear. Desta forma, a corrente i_r pedida à rede de energia eléctrica contém harmónicas múltiplas de uma frequência fundamental.

A decomposição das expressões das correntes i_r e i_{rdc} em série de Fourier consiste num método que permite conhecer os seus conteúdos harmónicos em detalhe. Pretendem-se determinar as séries de Fourier das correntes i_r e i_{rdc} para qualquer rectificador monofásico em ponte não controlado com carga RC, apenas a partir dos seus parâmetros dados indicados em (3.11) e (3.12).

Qualquer função periódica $f(t)$ pode ser descrita segundo a série de Fourier na forma trigonométrica:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(\omega t) + b_1 \text{sen}(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + b_2 \text{sen}(2\omega t) + \dots + a_n \cos(n\omega t) + b_n \text{sen}(n\omega t) \quad (3.26)$$

Ou, alternativamente:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \text{sen}(n\omega t) \quad (3.27)$$

Em (3.27), o termo $a_0/2$ representa o valor médio da função $f(\omega t)$ e a_0 pode ser calculado através de:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t \quad (3.28)$$

Para uma função do tipo $f(\omega t)$, tal como (3.11) e (3.12), os coeficientes a_n e b_n da série de Fourier são obtidos da seguinte forma:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (3.29)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (3.30)$$

3.3.4.1. Determinação dos coeficientes da série de Fourier para a corrente i_{rdc}

A corrente i_{rdc} é caracterizada por (3.11). Desta forma, os seus coeficientes da série de Fourier $a_0/2$, a_n e b_n podem ser conhecidos integrando as expressões que definem $i_{rdc}(\omega t)$ nos respectivos intervalos.

Determinação de $a_0/2$, valor médio de i_{rdc}

Partindo de (3.28), tem-se:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t \quad (3.31)$$

Substituindo $f(\omega t)$ por $i_{rdc}(\omega t)$ obtém-se:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \sin(\omega t + \phi) d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} -\frac{\sqrt{2} U}{Z} \sin(\omega t + \phi) d\omega t \quad (3.32)$$

$$a_0 = \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi} [-\cos(\omega t + \phi)]_{\beta}^{\pi-\phi} - \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi} [-\cos(\omega t + \phi)]_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} \quad (3.33)$$

$$a_0 = \frac{\sqrt{2} U}{\pi Z} (2 + \cos(\beta + \phi) - \cos(\pi + \beta + \phi)) \quad (3.34)$$

Desta forma, o valor médio $a_0/2$ é:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} (2 + \cos(\beta + \phi) - \cos(\pi + \beta + \phi)) \quad (3.35)$$

Determinação dos coeficientes a_n de i_{rdc}

A partir da expressão (3.29), tem-se:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} a_n = & \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \cos(n\omega t) d\omega t + \\ & + \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} -\frac{\sqrt{2} U}{Z} \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \cos(n\omega t) d\omega t \end{aligned} \quad (3.37)$$

Recorrendo à seguinte igualdade trigonométrica,

$$\operatorname{sen}(a) \cos(b) = \frac{\operatorname{sen}(a+b)}{2} + \frac{\operatorname{sen}(a-b)}{2} \quad (3.38)$$

onde $a = \omega t + \phi$ e $b = n\omega t$, aplicando em (3.37) obtém-se:

$$\begin{aligned} a_n = & \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi} \int_{\beta}^{\pi-\phi} \left(\frac{\operatorname{sen}(\omega t + \phi + n\omega t)}{2} + \frac{\operatorname{sen}(\omega t + \phi - n\omega t)}{2} \right) d\omega t + \\ & - \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi} \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} \left(\frac{\operatorname{sen}(\omega t + \phi + n\omega t)}{2} + \frac{\operatorname{sen}(\omega t + \phi - n\omega t)}{2} \right) d\omega t \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} a_n = & \frac{\sqrt{2} U}{Z 2\pi} \int_{\beta}^{\pi-\phi} \left(\operatorname{sen}((n+1)\omega t + \phi) + \operatorname{sen}((-n+1)\omega t + \phi) \right) d\omega t + \\ & - \frac{\sqrt{2} U}{Z 2\pi} \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} \left(\operatorname{sen}((n+1)\omega t + \phi) + \operatorname{sen}((-n+1)\omega t + \phi) \right) d\omega t \end{aligned} \quad (3.40)$$

Considerando as seguintes substituições de variável:

$$x = (n + 1) \omega t + \phi \Rightarrow dx = (n + 1) d\omega t \quad (3.41)$$

$$y = (-n + 1) \omega t + \phi \Rightarrow dy = (-n + 1) d\omega t \quad (3.42)$$

Substituindo em (3.40), tem-se:

$$\begin{aligned} a_n = & \frac{\sqrt{2} U}{Z 2\pi} \left(\frac{1}{(n + 1)} \int_{\beta}^{\pi-\phi} \text{sen}(x) dx + \frac{1}{(-n + 1)} \int_{\beta}^{\pi-\phi} \text{sen}(y) dy \right) + \\ & - \frac{\sqrt{2} U}{Z 2\pi} \left(\frac{1}{(n + 1)} \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} \text{sen}(x) dx + \frac{1}{(-n + 1)} \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} \text{sen}(y) dy \right) \end{aligned} \quad (3.43)$$

Integrando os termos seno obtém-se:

$$\begin{aligned} a_n = & \frac{\sqrt{2} U}{Z 2\pi} \left(\frac{1}{(n + 1)} [-\cos(x)]_{\beta}^{\pi-\phi} + \frac{1}{(-n + 1)} [-\cos(y)]_{\beta}^{\pi-\phi} \right) + \\ & - \frac{\sqrt{2} U}{Z 2\pi} \left(\frac{1}{(n + 1)} [-\cos(x)]_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} + \frac{1}{(-n + 1)} [-\cos(y)]_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} \right) \end{aligned} \quad (3.44)$$

Retornando às variáveis originais:

$$\begin{aligned} a_n = & \frac{\sqrt{2} U}{Z 2\pi} \left(\frac{-[\cos((n + 1)\omega t + \phi)]_{\beta}^{\pi-\phi}}{(n + 1)} + \frac{-[\cos((-n + 1)\omega t + \phi)]_{\beta}^{\pi-\phi}}{(-n + 1)} \right) + \\ & - \frac{\sqrt{2} U}{Z 2\pi} \left(\frac{-[\cos((n + 1)\omega t + \phi)]_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi}}{(n + 1)} + \frac{-[\cos((-n + 1)\omega t + \phi)]_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi}}{(-n + 1)} \right) \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} a_n = & \\ = & \frac{\sqrt{2} U}{Z 2\pi} \left[\frac{-(-n + 1)\cos((n + 1)\omega t + \phi) - (n + 1)\cos((-n + 1)\omega t + \phi)}{(n + 1)(-n + 1)} \right]_{\beta}^{\pi-\phi} + \\ & - \frac{\sqrt{2} U}{Z 2\pi} \left[\frac{-(-n + 1)\cos((n + 1)\omega t + \phi) - (n + 1)\cos((-n + 1)\omega t + \phi)}{(n + 1)(-n + 1)} \right]_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} \end{aligned} \quad (3.46)$$

Após algumas simplificações obtém-se a_n :

$$a_n = \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (n^2 - 1)} [n \operatorname{sen}(n\omega t) \operatorname{sen}(\omega t + \phi) + \cos(\omega t + \phi) \cos(n\omega t)]_{\beta}^{\pi-\phi} +$$

$$- \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (n^2 - 1)} [n \operatorname{sen}(n\omega t) \operatorname{sen}(\omega t + \phi) + \cos(\omega t + \phi) \cos(n\omega t)]_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} \quad (3.47)$$

Segundo a expressão (3.47) que define os termos a_n , para $n=1$ existe uma indeterminação, o que requer o cálculo do termo a_1 separadamente.

Determinação do coeficiente a_1 de i_{rdc}

A partir da expressão (3.29) tem-se:

$$a_1 = \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \cos(\omega t) d\omega t +$$

$$+ \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} -\frac{\sqrt{2} U}{Z} \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \cos(\omega t) d\omega t \quad (3.48)$$

Realizando a integração obtém-se a_1 :

$$a_1 = \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\operatorname{sen}(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \phi) \right]_{\beta}^{\pi-\phi} +$$

$$- \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\operatorname{sen}(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \phi) \right]_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} \quad (3.49)$$

Determinação dos coeficientes b_n de i_{rdc}

A partir da expressão (3.30), tem-se:

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \operatorname{sen}(n\omega t) d\omega t \quad (3.50)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \operatorname{sen}(n\omega t) d\omega t +$$

$$+ \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} -\frac{\sqrt{2} U}{Z} \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \operatorname{sen}(n\omega t) d\omega t \quad (3.51)$$

O processo de integração de (3.51) é similar ao utilizado na determinação de a_n , isto é, recorrendo a igualdades trigonométricas e substituição de variáveis é possível obter b_n :

$$\begin{aligned}
 b_n &= \\
 &= \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (-n^2 + 1)} [n \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \cos(n\omega t) - \operatorname{sen}(n\omega t) \cos(\omega t + \phi)]_{\beta}^{\pi-\phi} - \\
 &+ \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (-n^2 + 1)} [n \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \cos(n\omega t) - \operatorname{sen}(n\omega t) \cos(\omega t + \phi)]_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi}
 \end{aligned} \quad (3.52)$$

De forma semelhante, a expressão (3.52) origina uma indeterminação para $n = 1$.

Determinação do coeficiente b_1 de i_{rdc}

A partir da expressão (3.30), com $n = 1$ tem-se:

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \operatorname{sen}(\omega t) d\omega t + \\
 &+ \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} -\frac{\sqrt{2} U}{Z} \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \operatorname{sen}(\omega t) d\omega t
 \end{aligned} \quad (3.53)$$

Realizando a integração obtém-se b_1 :

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\cos(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \operatorname{sen}(2\omega t + \phi) \right]_{\beta}^{\pi-\phi} + \\
 &- \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\cos(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \operatorname{sen}(2\omega t + \phi) \right]_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi}
 \end{aligned} \quad (3.54)$$

Em resumo, os coeficientes da série de Fourier da corrente i_{rdc} são dados pelas seguintes expressões:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} (2 + \cos(\beta + \phi) - \cos(\pi + \beta + \phi)) \quad (3.35)$$

$$a_n = \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (n^2 - 1)} [n \operatorname{sen}(n\omega t) \operatorname{sen}(\omega t + \phi) + \cos(\omega t + \phi) \cos(n\omega t)]_{\beta}^{\pi - \phi} + \quad (3.47)$$

$$- \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (n^2 - 1)} [n \operatorname{sen}(n\omega t) \operatorname{sen}(\omega t + \phi) + \cos(\omega t + \phi) \cos(n\omega t)]_{\pi + \beta}^{2\pi - \phi}$$

$$a_1 = \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\operatorname{sen}(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \phi) \right]_{\beta}^{\pi - \phi} + \quad (3.49)$$

$$- \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\operatorname{sen}(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \phi) \right]_{\pi + \beta}^{2\pi - \phi}$$

$$b_n =$$

$$= \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (-n^2 + 1)} [n \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \cos(n\omega t) - \operatorname{sen}(n\omega t) \cos(\omega t + \phi)]_{\beta}^{\pi - \phi} - \quad (3.52)$$

$$+ \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (-n^2 + 1)} [n \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \cos(n\omega t) - \operatorname{sen}(n\omega t) \cos(\omega t + \phi)]_{\pi + \beta}^{2\pi - \phi}$$

$$b_1 = \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\cos(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \operatorname{sen}(2\omega t + \phi) \right]_{\beta}^{\pi - \phi} + \quad (3.54)$$

$$- \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\cos(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \operatorname{sen}(2\omega t + \phi) \right]_{\pi + \beta}^{2\pi - \phi}$$

3.3.4.2. Determinação dos coeficientes da série de Fourier para a corrente i_r

A corrente no lado alternado do retificador i_r é caracterizada por (3.12). Desta forma, os seus coeficientes da série de Fourier $a_0/2$, a_n e b_n podem ser conhecidos integrando as expressões que definem $i_r(\omega t)$ nos respectivos intervalos.

Os processos de cálculo serão exactamente os mesmos utilizados no caso anterior. Conforme indicam as expressões (3.11) e (3.12), a única diferença entre as equações de i_{rdc} e de i_r reside no sinal das funções no intervalo: $\pi + \beta < \omega t < 2\pi - \phi$.

Determinação de $a_0/2$, valor médio de i_r

Partindo de (3.28), tem-se:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t \quad (3.55)$$

Substituindo $f(\omega t)$ por $i_r(\omega t)$ tem-se:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \text{sen}(\omega t + \phi) d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \text{sen}(\omega t + \phi) d\omega t \quad (3.56)$$

$$a_0 = 0 \quad (3.57)$$

Desta forma, o valor médio $a_0/2$ é:

$$\frac{a_0}{2} = 0 \quad (3.58)$$

Conforme se pode deduzir através da representação da corrente i_r nas figuras 3.6 e 3.7, os cálculos anteriores demonstram que o valor médio de i_r é nulo.

Determinação dos coeficientes a_n de i_r

A partir da expressão (3.29), tem-se:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (3.59)$$

$$\begin{aligned}
a_n = & \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \cos(n\omega t) d\omega t + \\
& + \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \cos(n\omega t) d\omega t
\end{aligned} \tag{3.60}$$

Realizando a integração obtém-se a_n :

$$\begin{aligned}
a_n = & \\
= & \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (n^2 - 1)} [n \operatorname{sen}(n\omega t) \operatorname{sen}(\omega t + \phi) + \cos(\omega t + \phi) \cos(n\omega t)]_{\beta}^{\pi-\phi} + \\
& + \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (n^2 - 1)} [n \operatorname{sen}(n\omega t) \operatorname{sen}(\omega t + \phi) + \cos(\omega t + \phi) \cos(n\omega t)]_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi}
\end{aligned} \tag{3.61}$$

Segundo a expressão (3.61) que define os termos a_n , para $n=1$ existe uma indeterminação, o que requer o cálculo do termo a_1 separadamente.

Determinação do coeficiente a_1 de i_r

A partir da expressão (3.29), tem-se:

$$\begin{aligned}
a_1 = & \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \cos(\omega t) d\omega t + \\
& + \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \cos(\omega t) d\omega t
\end{aligned} \tag{3.62}$$

Realizando a integração obtém-se a_1 :

$$\begin{aligned}
a_1 = & \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\operatorname{sen}(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \phi) \right]_{\beta}^{\pi-\phi} + \\
& + \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\operatorname{sen}(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \phi) \right]_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi}
\end{aligned} \tag{3.63}$$

Determinação dos coeficientes b_n de i_r

A partir da expressão (3.30), tem-se:

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \operatorname{sen}(n\omega t) d\omega t \tag{3.64}$$

$$\begin{aligned}
b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \text{sen}(\omega t + \phi) \text{sen}(n\omega t) d\omega t + \\
&+ \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \text{sen}(\omega t + \phi) \text{sen}(n\omega t) d\omega t
\end{aligned} \tag{3.65}$$

Realizando a integração obtém-se b_n :

$$\begin{aligned}
b_n &= \\
&= \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (-n^2 + 1)} [n \text{sen}(\omega t + \phi) \cos(n\omega t) - \text{sen}(n\omega t) \cos(\omega t + \phi)]_{\beta}^{\pi-\phi} + \\
&+ \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (-n^2 + 1)} [n \text{sen}(\omega t + \phi) \cos(n\omega t) - \text{sen}(n\omega t) \cos(\omega t + \phi)]_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi}
\end{aligned} \tag{3.66}$$

A expressão (3.66) origina uma indeterminação.

Determinação do coeficiente b_1 de i_r

A partir da expressão (3.30), com $n = 1$ tem-se:

$$\begin{aligned}
b_1 &= \frac{1}{\pi} \int_{\beta}^{\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \text{sen}(\omega t + \phi) \text{sen}(\omega t) d\omega t + \\
&+ \frac{1}{\pi} \int_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi} \frac{\sqrt{2} U}{Z} \text{sen}(\omega t + \phi) \text{sen}(\omega t) d\omega t
\end{aligned} \tag{3.67}$$

Realizando a integração obtém-se b_1 :

$$\begin{aligned}
b_1 &= \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\cos(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \text{sen}(2\omega t + \phi) \right]_{\beta}^{\pi-\phi} + \\
&+ \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\cos(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \text{sen}(2\omega t + \phi) \right]_{\pi+\beta}^{2\pi-\phi}
\end{aligned} \tag{3.68}$$

Em resumo, os coeficientes da série de Fourier da corrente i_r são dados pelas seguintes expressões:

$$\frac{a_0}{2} = 0 \quad (3.58)$$

$$\begin{aligned} a_n &= \\ &= \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (n^2 - 1)} [n \operatorname{sen}(n\omega t) \operatorname{sen}(\omega t + \phi) + \cos(\omega t + \phi) \cos(n\omega t)]_{\beta}^{\pi - \phi} + \\ &+ \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (n^2 - 1)} [n \operatorname{sen}(n\omega t) \operatorname{sen}(\omega t + \phi) + \cos(\omega t + \phi) \cos(n\omega t)]_{\pi + \beta}^{2\pi - \phi} \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\operatorname{sen}(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \phi) \right]_{\beta}^{\pi - \phi} + \\ &+ \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\operatorname{sen}(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + \phi) \right]_{\pi + \beta}^{2\pi - \phi} \end{aligned} \quad (3.63)$$

$$\begin{aligned} b_n &= \\ &= \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (-n^2 + 1)} [n \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \cos(n\omega t) - \operatorname{sen}(n\omega t) \cos(\omega t + \phi)]_{\beta}^{\pi - \phi} + \\ &+ \frac{\sqrt{2} U}{Z \pi (-n^2 + 1)} [n \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \cos(n\omega t) - \operatorname{sen}(n\omega t) \cos(\omega t + \phi)]_{\pi + \beta}^{2\pi - \phi} \end{aligned} \quad (3.66)$$

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\cos(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \operatorname{sen}(2\omega t + \phi) \right]_{\beta}^{\pi - \phi} + \\ &+ \frac{\sqrt{2} U}{2\pi Z} \left[\cos(\phi) \omega t - \frac{1}{2} \operatorname{sen}(2\omega t + \phi) \right]_{\pi + \beta}^{2\pi - \phi} \end{aligned} \quad (3.68)$$

3.3.4.3. Validação de resultados da análise de Fourier das correntes do retificador

Recorrendo às expressões calculadas anteriormente e que permitem conhecer os coeficientes da série de Fourier para as correntes i_{rdc} e i_r , apresenta-se de seguida um exemplo de cálculo.

Os parâmetros do retificador considerados foram os mesmos do subcapítulo 3.3.2: $U = 230$ V; $f = 50$ Hz ($\omega = 314$ rad/s); $R = 3822$ Ω ; $C = 5,6$ μ F. Considera-se que estes parâmetros representam uma lâmpada compacta fluorescente de potência activa igual a 20 W com uma *ripple* no lado contínuo do retificador de 30 %.

O cálculo foi realizado até à harmónica de ordem 40, correspondente a 2000 Hz. Tal como no subcapítulo 3.3.2, será feita a comparação com resultados de simulação obtidos através de MATLAB/Simulink.

Segundo a expressão (3.4), para este tipo de carga tem-se $\phi = 1,4232$ rad. Desta forma, considerando este valor e recorrendo ao polinómio $\beta = f(\phi)$ indicado em (3.25), obtém-se $\beta = 0,8068$ rad.

Na tabelas 3.8 e 3.9 apresentam-se os coeficientes a_n e b_n da série de Fourier para cada uma das correntes, i_{rdc} e i_r ; as amplitudes c_n de cada harmónica calculadas segundo a equação (3.69) e ainda o valor médio obtido:

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (3.69)$$

Tabela 3.8 – Amplitudes harmônicas de i_{rdc}

| n | a_n (A) | b_n (A) | c_n (A) |
|-----|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 2 | -0,0797 | 0,1025 | 0,1299 |
| 3 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 4 | -0,0287 | -0,0923 | 0,0967 |
| 5 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 6 | 0,0570 | 0,0082 | 0,0576 |
| 7 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 8 | -0,0050 | 0,0316 | 0,0320 |
| 9 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 10 | -0,0289 | -0,0003 | 0,0289 |
| 11 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 12 | 0,0052 | -0,0266 | 0,0271 |
| 13 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 14 | 0,0194 | 0,0067 | 0,0205 |
| 15 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 16 | -0,0043 | 0,0165 | 0,0170 |
| 17 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 18 | -0,0163 | -0,0049 | 0,0170 |
| 19 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 20 | 0,0065 | -0,0137 | 0,0151 |
| 21 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 22 | 0,0113 | 0,0055 | 0,0126 |
| 23 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 24 | -0,0050 | 0,0110 | 0,0121 |
| 25 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 26 | -0,0101 | -0,0060 | 0,0118 |
| 27 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 28 | 0,0059 | -0,0084 | 0,0102 |
| 29 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 30 | 0,0078 | 0,0052 | 0,0094 |
| 31 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 32 | -0,0056 | 0,0075 | 0,0094 |
| 33 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 34 | -0,0064 | -0,0059 | 0,0087 |
| 35 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 36 | 0,0054 | -0,0057 | 0,0078 |
| 37 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 38 | 0,0056 | 0,0053 | 0,0077 |
| 39 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 40 | -0,0056 | 0,0050 | 0,0075 |

Valor médio $a_{\theta/2} = 0,0714$ Tabela 3.9 – Amplitudes harmônicas de i_r

| n | a_n (A) | b_n (A) | c_n (A) |
|-----|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0,0609 | 0,1254 | 0,1394 |
| 2 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 3 | -0,1130 | -0,0218 | 0,1151 |
| 4 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 5 | 0,0517 | -0,0567 | 0,0767 |
| 6 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 7 | 0,0224 | 0,0353 | 0,0418 |
| 8 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 9 | -0,0211 | 0,0195 | 0,0288 |
| 10 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 11 | -0,0186 | -0,0219 | 0,0288 |
| 12 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 13 | 0,0211 | -0,0114 | 0,0240 |
| 14 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 15 | 0,0083 | 0,0160 | 0,0180 |
| 16 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 17 | -0,0146 | 0,0088 | 0,0170 |
| 18 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 19 | -0,0066 | -0,0150 | 0,0164 |
| 20 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 21 | 0,0130 | -0,0042 | 0,0137 |
| 22 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 23 | 0,0042 | 0,0113 | 0,0121 |
| 24 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 25 | -0,0115 | 0,0037 | 0,0121 |
| 26 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 27 | -0,0021 | -0,0108 | 0,0111 |
| 28 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 29 | 0,0095 | -0,0017 | 0,0096 |
| 30 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 31 | 0,0017 | 0,0093 | 0,0094 |
| 32 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 33 | -0,0091 | 0,0008 | 0,0092 |
| 34 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 35 | -0,0002 | -0,0082 | 0,0082 |
| 36 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 37 | 0,0077 | -0,0003 | 0,0077 |
| 38 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 39 | -0,0001 | 0,0077 | 0,0077 |
| 40 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

Valor médio $a_{\theta/2} = 0$

Na figura 3.11 mostra-se uma representação de um período de cada uma das correntes, i_{rdc} e i_r . As formas de onda obtidas são semelhantes às formas de onda teóricas apresentadas anteriormente na figura 3.6 e aos resultados de simulação da figura 3.12. No entanto, e considerando que o cálculo da série de Fourier foi efectuada apenas até à harmónica de ordem 40, observa-se alguma oscilação, o que é designado por *fenómeno de Gibbs*. Desta forma, na figura 3.11 poder-se-iam obter formas de onda com menor oscilação caso o cálculo fosse realizado para uma ordem de harmónica máxima superior.

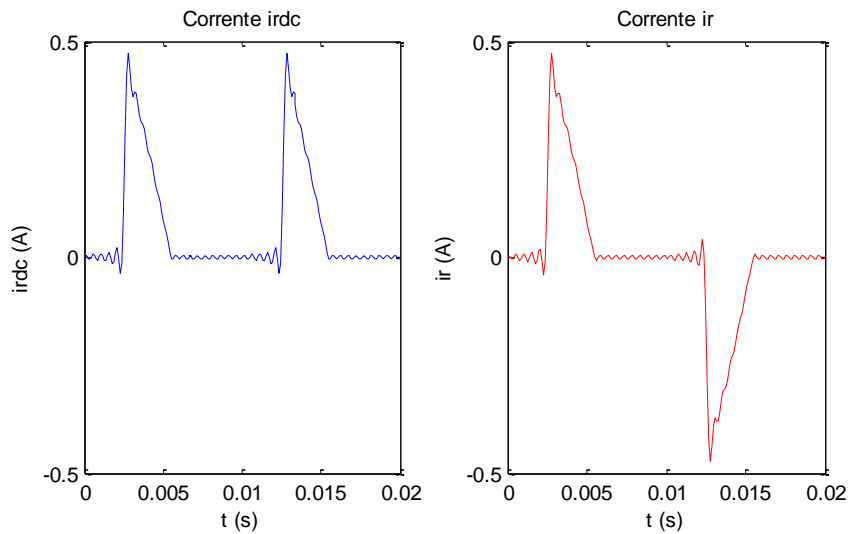


Figura 3.11 – Períodos das correntes i_{rdc} e i_r obtidas após análise de Fourier para uma lâmpada de 20 W

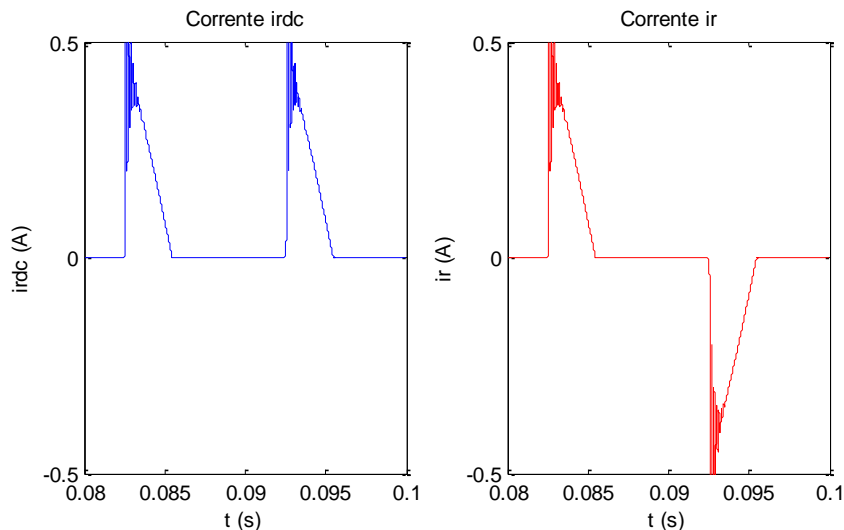


Figura 3.12 – Períodos das correntes i_{rdc} e i_r obtidas através de simulação para uma lâmpada de 20 W

A figura 3.13 contém uma representação gráfica da tabela 3.8, ou seja, das amplitudes de cada harmónica da corrente i_{rdc} . Para comparação, mostra-se na figura 3.14 o espectro harmónico da corrente i_{rdc} obtido através de simulação, o qual é bastante similar:

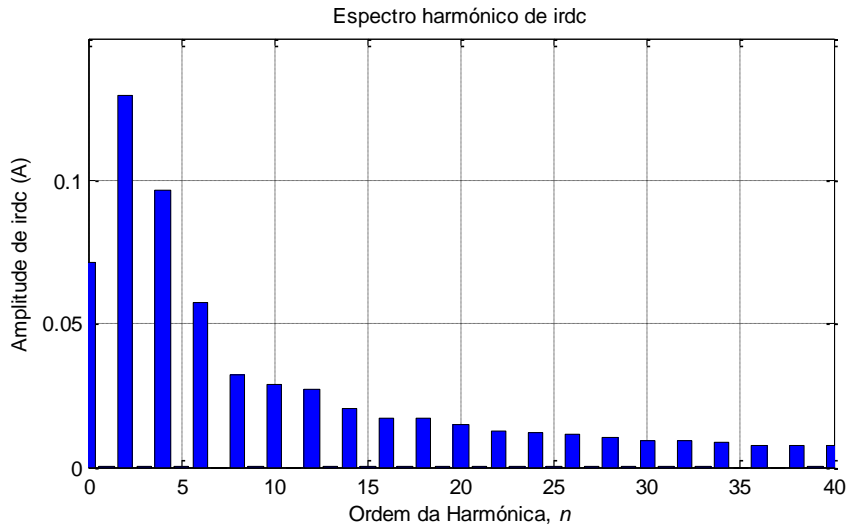


Figura 3.13 – Espectro harmónico da corrente i_{rdc} obtido após análise de Fourier

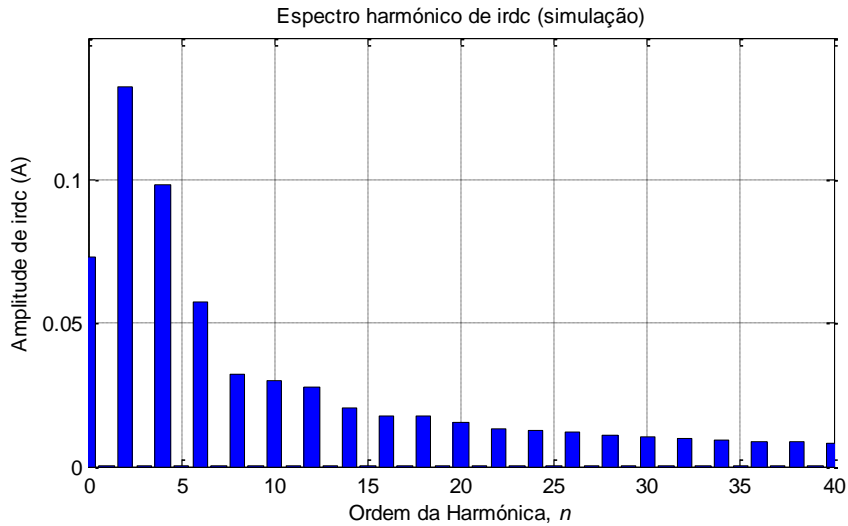


Figura 3.14 – Espectro harmónico da corrente i_{rdc} obtido através de simulação

A figura 3.15 contém uma representação gráfica da tabela 3.9, ou seja, das amplitudes de cada harmónica da corrente i_r . De forma idêntica ao caso anterior, é apresentado na figura 3.16 o espectro harmónico da corrente i_r obtido através de simulação.

Em qualquer uma das figuras, analisando o espectro da corrente no lado alternado do retificador, i_r , destaca-se o valor médio nulo da corrente ou, por outras palavras, a inexistência de uma componente contínua, assim como a presença de apenas harmónicas de ordem ímpar ($n = 1, 3, 5, \dots$).

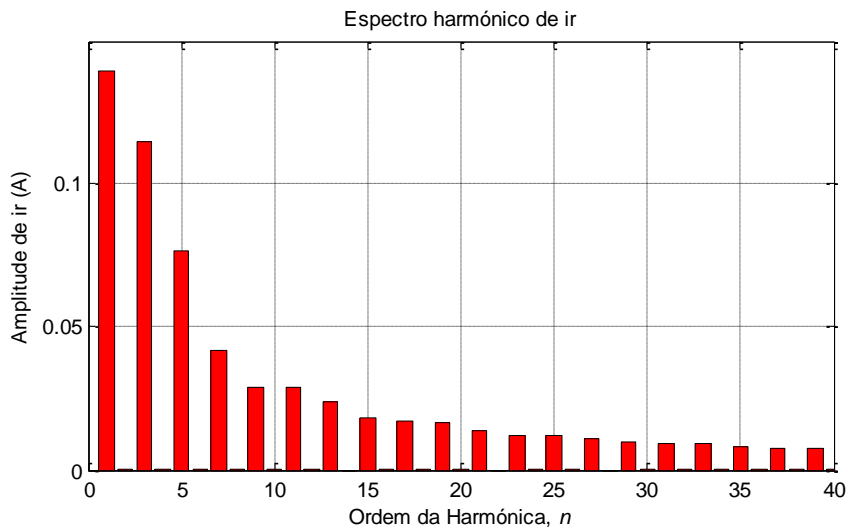


Figura 3.15 – Espectro harmónico da corrente i_r obtido após análise de Fourier

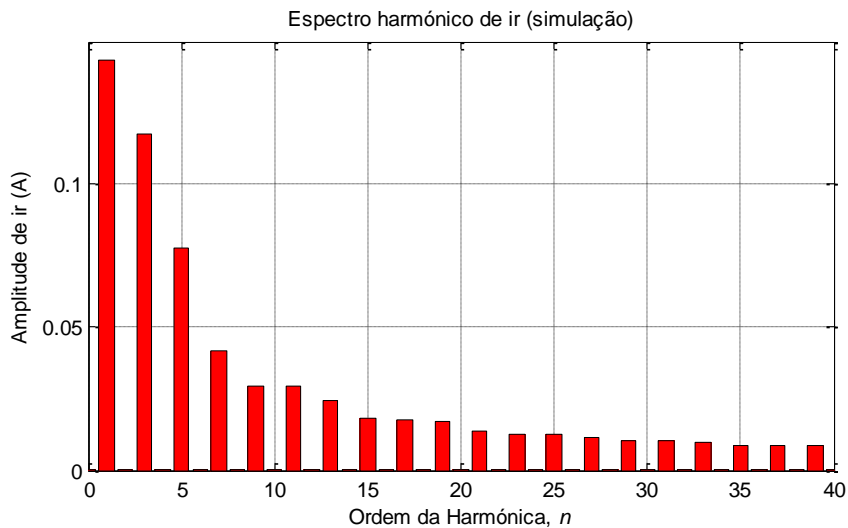


Figura 3.16 – Espectro harmónico da corrente i_r obtido através de simulação

4. *Hardware e software* de condicionamento e aquisição de sinal para ensaios experimentais

4.1. Descrição do *hardware*

De forma a realizar os ensaios experimentais destinados à caracterização do conteúdo harmónico produzido pelas lâmpadas compactas foi desenvolvido um sistema de aquisição dos sinais de tensão e de corrente. O sistema baseia-se num computador pessoal com barramento PCI (*Peripheral Component Interconnect*) equipado com uma carta de aquisição de sinal PCI-6024E da National Instruments.

A carta de aquisição utilizada dispõe de 8 entradas analógicas do tipo diferencial para sinais de tensão bipolares de -10 V a +10 V. O conversor A/D (analógico-digital) tem uma resolução de 12 bits e um ritmo de conversão máximo de 200.000 amostras por segundo [13].

Para permitir o acesso às entradas analógicas da carta de aquisição utilizou-se uma consola BNC-2120 da National Instruments [14], ligada à carta de aquisição através de um cabo de comunicação do tipo SH68-68-EP do mesmo fabricante. Na seguinte figura ilustra-se a consola BNC-2120:



Figura 4.1 – Consola BNC-2120 da National Instruments

Esta consola dispõe de 8 entradas analógicas do tipo diferencial através de fichas BNC. A entrada AI0 (*Analog Input 0*) realiza a aquisição do sinal de tensão e a aquisição do sinal de corrente é efectuada através da entrada AI1 (*Analog Input 1*) [14].

Existe ainda uma entrada BNC na consola para um sinal de disparo externo (*trigger*) designada por PFI0 (*Programmable Function Input channel 0*). O sinal de *trigger* é gerado através de um circuito comparador com histerese, de forma a sincronizar a aquisição dos sinais com a tensão na primeira fase da rede eléctrica.

Para a leitura dos sinais de tensão e de corrente foi utilizada uma placa de condicionamento de sinal, a qual contém um transdutor LEM LV 25-P para a medição da tensão [15] e um transdutor LEM LA 25-NP destinado à medição da corrente [16]. Tratam-se de transdutores de efeito de Hall que promovem isolamento galvânico entre o primário e o secundário e que apresentam boas características de exactidão e linearidade. Na seguinte figura apresenta-se a placa de condicionamento de sinal:

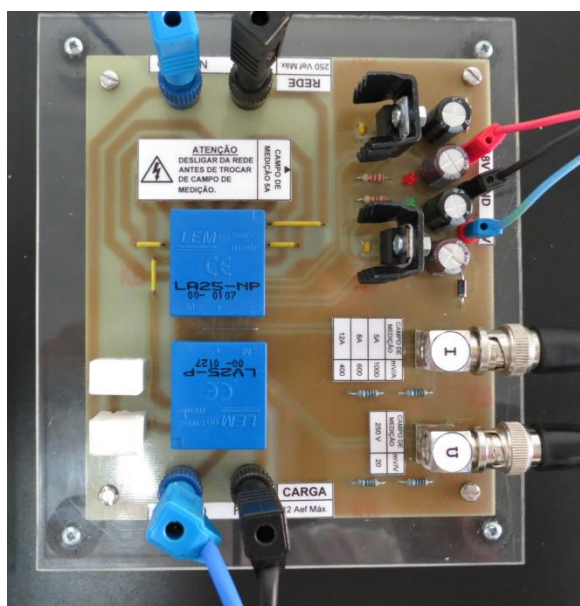


Figura 4.2 – Placa de condicionamento de sinal com transdutores LA 25-NP e LV 25-P

A placa de condicionamento de sinal possui duas fichas do tipo BNC, visíveis na figura anterior e designadas por “U” e “I”, para ligação aos canais AI0 e AI1 da consola, para efeitos de aquisição de sinal. Tem igualmente ligações de fase e neutro à instalação eléctrica de 230 V_{ac} no topo da placa e, na sua base, ligações fase e neutro a um suporte específico para as lâmpadas a ensaiar.

Finalmente, foi utilizado o *software* LabVIEW 7.0 da National Instruments para a criação de um programa destinado à aquisição dos sinais de tensão e corrente.

4.2. Dimensionamento dos transdutores

Segundo as instruções fornecidas pelo fabricante do transdutor de tensão LV 25-P, é necessário dimensionar uma resistência para colocação em série com o terminal “+HT” para que no primário do transdutor se obtenha a corrente nominal em valor eficaz de 10 mA [15]. Considerando um campo de medição de tensão eficaz de 250 V, pela seguinte expressão calcula-se a resistência a colocar, $R_{3,4}$:

$$R_{3,4} = \frac{U}{I} = \frac{250}{0,010} = 25000 \Omega = 25 \text{ k}\Omega \quad (4.1)$$

O secundário do transdutor de tensão corresponde ao terminal “M” e a sua corrente nominal em valor eficaz é de 25 mA [15]. Assim sendo, é necessário dimensionar outra resistência, $R_{7,8}$, para converter a corrente de saída do transdutor num sinal de tensão. Considerando uma tensão de saída desejada de 5 V, tem-se:

$$R_{7,8} = \frac{U}{I} = \frac{5}{0,025} = 200 \Omega \quad (4.2)$$

Atendendo aos valores de resistências dimensionados, o campo de medição de tensão em valor eficaz é de 250 V e a saída do transdutor é de 5 V, o que origina um ganho de conversão tensão/tensão de 20 mV/V (5 V/ 250V).

Quanto ao transdutor de corrente LA 25-NP, a corrente nominal no primário pode ser seleccionada através das várias ligações possíveis entre os terminais 1 a 10 do transdutor, numa gama de valores eficazes de 5 a 25 A [16]. No presente caso adoptou-se um campo de medição, isto é, uma corrente nominal em valor eficaz de 5 A no primário.

Desta forma, segundo as especificações do fabricante a corrente eficaz no secundário do transdutor será de 25 mA (terminal “M”) [16]. Tal como no transdutor de tensão, para o transdutor de corrente é igualmente necessário dimensionar uma resistência para converter a corrente de saída do transdutor num sinal de tensão. Considerando novamente uma tensão de saída desejada de 5 V, a resistência $R_{5,6}$ a colocar é dada por:

$$R_{5,6} = \frac{U}{I} = \frac{5}{0,025} = 200 \Omega \quad (4.3)$$

Assim sendo, o campo de medição de corrente em valor eficaz corresponde a 5 A e o ganho de conversão tensão/corrente obtido é de 1000 mV/A (5 V/5 A).

Na seguinte figura apresenta-se um esquema das ligações presentes na placa de condicionamento de sinal, incluindo as resistências dimensionadas para os transdutores:

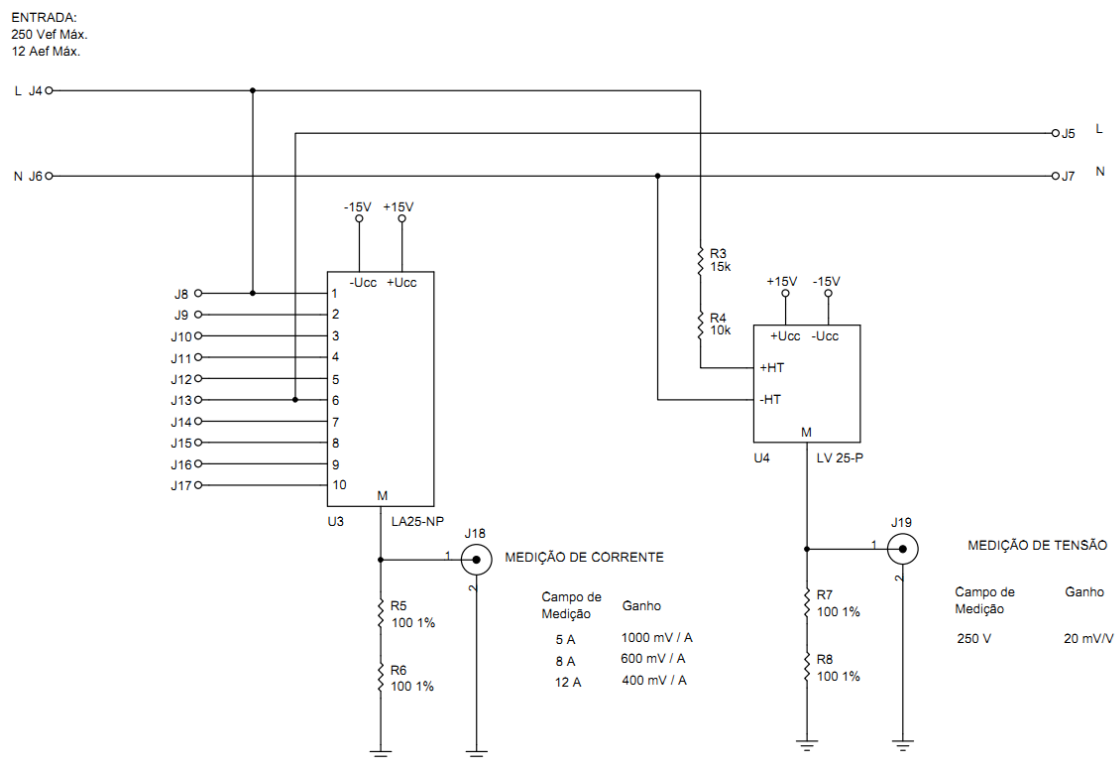


Figura 4.3 – Esquema da placa de condicionamento de sinal com os transdutores LV 25-P e LA 25-NP

No Anexo 2 encontra-se o *layout* da placa de circuito impresso acima descrita.

4.3. Descrição do *software*

O *software* LabVIEW da National Instruments é uma plataforma de desenvolvimento de aplicações através de uma linguagem de programação gráfica, compatível com os principais sistemas operativos utilizados em computadores pessoais.

Os programas criados em LabVIEW, também conhecidos como instrumentos virtuais ou VIs (*Virtual Instruments*), possuem esta designação porque a sua interface permite replicar o funcionamento de instrumentos físicos de medição. O facto de o LabVIEW ter capacidades de comunicação com um vasto leque de dispositivos de *hardware*, tais como equipamentos de aquisição e processamento de sinal, torna-o adequado para a sua aplicação em cadeias de medição.

Associada a estas capacidades, a utilização de uma linguagem de programação gráfica permite ao utilizador conceber instrumentos virtuais para diversos fins com relativa facilidade e flexibilidade de implementação, isto é, sem ser necessário recorrer à introdução de linhas de código tal como ocorre em linguagens de programação de alto nível. Ainda assim, visto que o LabVIEW utiliza uma linguagem de programação deste género, tem desvantagens inerentes tais como a rapidez de execução do código e a menor optimização do mesmo comparativamente a outras plataformas que empregam linguagens de baixo nível, tais como os microcontroladores.

Os programas criados em LabVIEW são constituídos por um painel frontal e por um diagrama de blocos. O painel frontal consiste na interface gráfica apresentada ao utilizador, onde é possível observar as variáveis de saída do programa designadas por indicadores, que tipicamente são gráficos, mostradores analógicos ou digitais, indicadores luminosos e tabelas, entre outros elementos. Do painel frontal constam também os controlos ou variáveis de entrada do programa, na forma de botões, selectores, potenciómetros e caixas de diálogo, conforme ilustrado na figura 4.4.

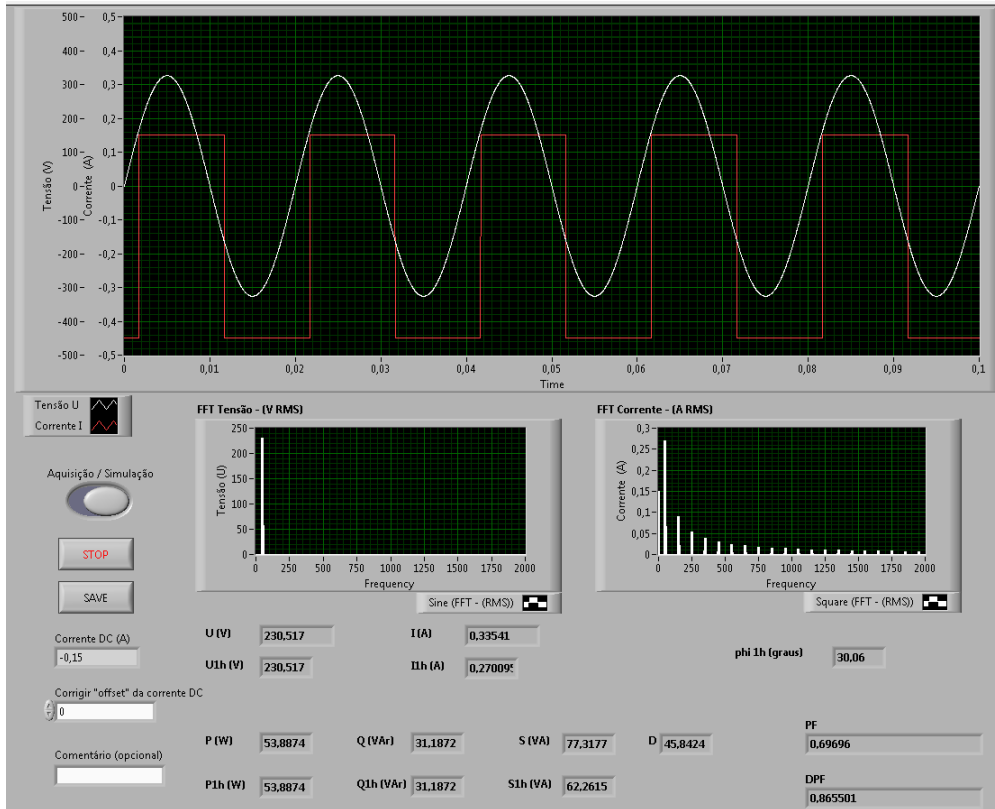


Figura 4.4 – Pormenor do painel frontal do programa desenvolvido em LabVIEW

Por sua vez, o diagrama de blocos (ver figura 4.5) consiste na “base” do programa, ou seja, o conjunto de blocos e ligações que executam operações sobre as variáveis de entrada de forma a apresentar os resultados que constam do painel frontal. É no diagrama de blocos que se configura a comunicação com outros dispositivos e que se realizam as operações matemáticas necessárias para o fim pretendido, recorrendo a ligações entre os elementos gráficos, rotinas, funções, entre outros.

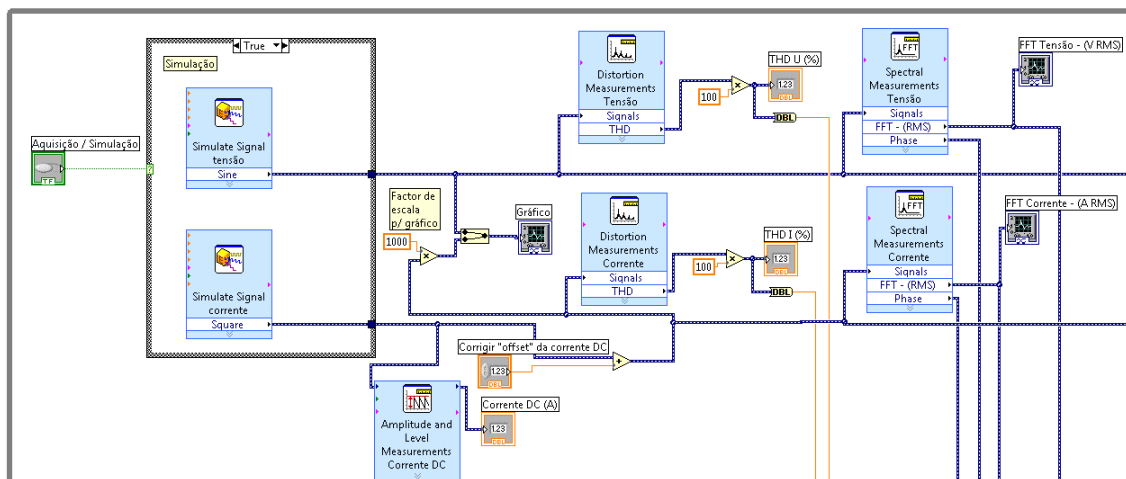


Figura 4.5 – Pormenor do diagrama de blocos do programa desenvolvido em LabVIEW

De seguida apresentam-se as principais características do programa desenvolvido em LabVIEW para a realização dos ensaios experimentais. Na secção descritiva do painel frontal são enumeradas as funcionalidades implementadas, enquanto na descrição do diagrama de blocos são explicados os cálculos realizados e as funções ou blocos integrados do LabVIEW utilizados para o efeito.

4.3.1. Painel frontal do programa desenvolvido em LabVIEW

No painel do frontal do programa (ver figura 4.6) existe um selector “Aquisição / Simulação” para efectuar a aquisição de dados através das entradas analógicas da carta de aquisição ou através de uma entrada simulada. Para terminar a execução do programa o utilizador dispõe de um botão de pressão “STOP”. Existe ainda outro botão de pressão “SAVE” destinado à exportação dos valores medidos.



Figura 4.6 – Selector para aquisição ou simulação e botões de pressão “STOP” e “SAVE”

Quando o botão “SAVE” é pressionado, o registo dos dados é efectuado simultaneamente de duas formas: dentro de uma directoria pré-definida no diagrama de blocos é criado um ficheiro de formato .xls (*Excel*, consultar figura 4.7) contendo um resumo dos principais valores medidos, nomeadamente:

- Valores eficazes das tensões U , U_{1h} e U_{nh} ($2 \leq n \leq 40$);
- Valores eficazes das correntes I , I_{1h} e I_{nh} ($2 \leq n \leq 40$);
- Potências activas P , P_{1h} e P_{nh} ($2 \leq n \leq 40$);
- Potências reactivas Q , Q_{1h} e Q_{nh} ($2 \leq n \leq 40$);
- Potências aparentes S , S_{1h} e S_{nh} ($2 \leq n \leq 40$);
- Potência deformante D ;
- Valores do Factor de Potência (PF) e Factor de Desfasamento (DPF);
- Valores de Distorção Harmónica Total da tensão (THD_U) e da corrente (THD_I);

- Ângulos de fase da tensão e da corrente α_{unh} e α_{inh} ($1 \leq n \leq 40$);
- Ângulos de defasamento entre tensão e corrente φ_{unh} ($1 \leq n \leq 40$);
- Comentário opcional introduzido pelo utilizador.

| | A | B | C | D |
|----|------------|-----------|------------|----------|
| 1 | U (V) | U1h (V) | THDu (%) | |
| 2 | 239,0986 | 239,0758 | 1,330325 | |
| 3 | | | | |
| 4 | I (A) | I1h (A) | THDi (%) | |
| 5 | 0,128775 | 0,085227 | 112,0905 | |
| 6 | | | | |
| 7 | P (W) | Q (VAr) | S (VA) | D (VA) |
| 8 | 18,60873 | -8,5387 | 30,78989 | 23,08357 |
| 9 | | | | |
| 10 | P1h (W) | Q1h (VAr) | S1h (VA) | |
| 11 | 18,5084 | -8,52084 | 20,37562 | |
| 12 | | | | |
| 13 | PF | DPF | | |
| 14 | 0,604378 | 0,90836 | | |
| 15 | | | | |
| 16 | Comentário | | | |
| 17 | | | | |
| 18 | | | | |
| 19 | Unh (V) | Inh (A) | phi_nh (°) | |
| 20 | 239,0922 | 0,085346 | -24,7315 | |
| 21 | 0,067422 | 0,000106 | -163,708 | |

Figura 4.7 – Exemplo do conteúdo do ficheiro Excel exportado pelo LabVIEW

Todos estes valores mencionados acima constam também do painel frontal do programa, através de mostradores digitais e de tabelas conforme representado na figura 4.8, existindo uma caixa de diálogo para a introdução manual do comentário por parte do utilizador.

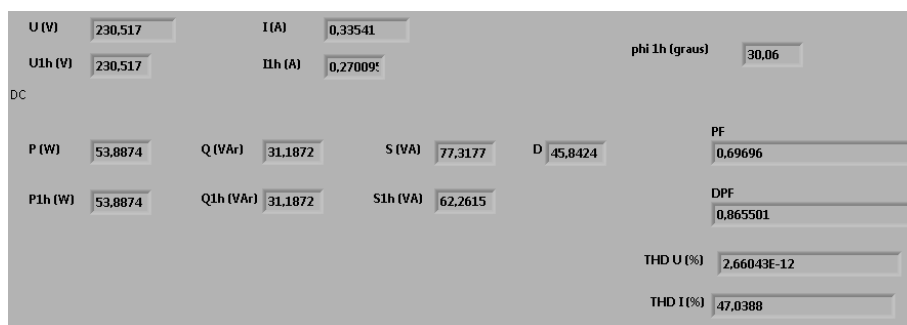


Figura 4.8 – Mostradores digitais para as várias grandezas medidas ou calculadas

A segunda forma de registo de dados consiste na gravação de quatro ficheiros de valores separados por vírgulas (CSV – *comma-separated values*) que contêm os valores eficazes das harmónicas de tensões e de correntes, assim como os ângulos de fase respectivos para a reconstrução posterior das formas de onda de tensão e de corrente. Estes valores são obtidos através da transformada rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier*

Transform) efectuada pelo bloco *Spectral Measurements* do LabVIEW, que decompõe todo o conteúdo harmónico dos sinais de tensão e de corrente.

A evolução das formas de onda de corrente e tensão é indicada através de um gráfico. Existem ainda dois gráficos de barras indicando os espectros harmónicos da tensão e da corrente até à quadragésima harmónica, correspondente a 2000 Hz, conforme ilustrado na seguinte figura.

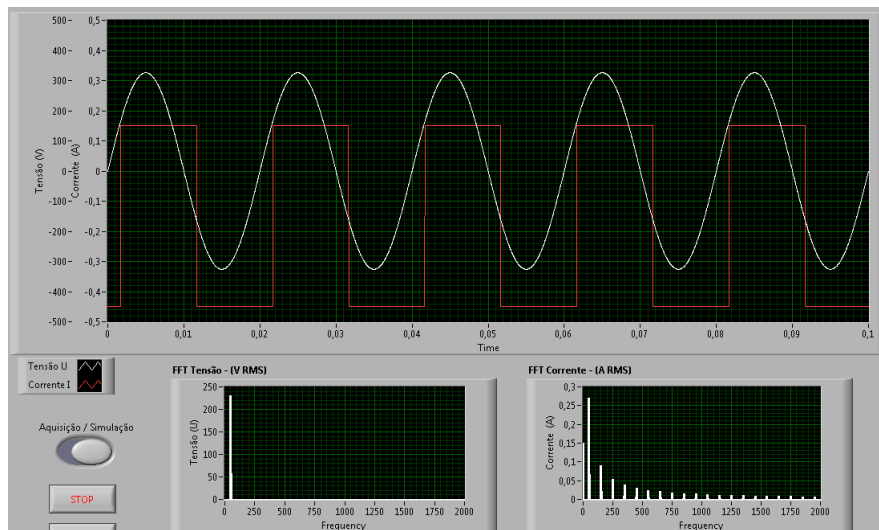


Figura 4.9 – Gráfico temporal e espectros harmónicos da tensão e da corrente

Nos primeiros ensaios experimentais realizados verificou-se a existência de uma componente contínua negativa de cerca de 10 mA na corrente medida, causada pela deriva de zero (*offset current*) do transdutor de corrente LA 25-NP. Este fenómeno é visível da forma de onda da corrente da figura 4.10, indicada a encarnado, onde a componente contínua negativa está presente:

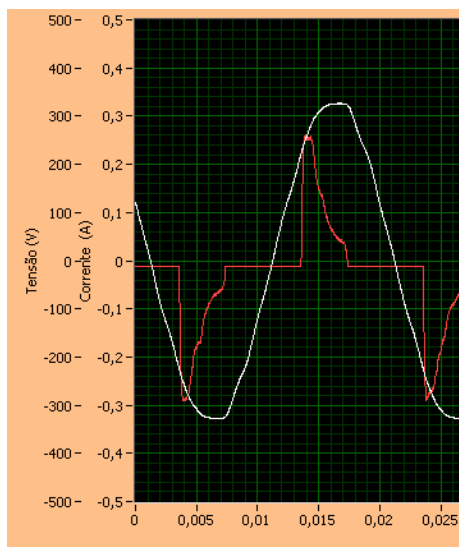


Figura 4.10 – Efeito da deriva de zero do transdutor de corrente

De forma a minimizar este efeito indesejável foi necessário implementar no programa uma correcção manual. Assim sendo, no painel frontal existe um indicador digital da componente de corrente contínua medida e um controlo, na forma de caixa de diálogo, onde o utilizador pode introduzir manualmente o valor desejado para anular a componente contínua observada, como representado na figura 4.11.

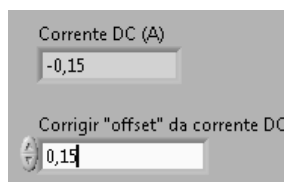


Figura 4.11 – Indicador e controlo para correcção da deriva de zero do transdutor de corrente

4.3.2. Diagrama de blocos do programa desenvolvido em LabVIEW

No diagrama de blocos do programa, os parâmetros da aquisição de dados são configurados através de um subprograma (*sub-VI*) criado para o efeito, representado na figura seguinte:

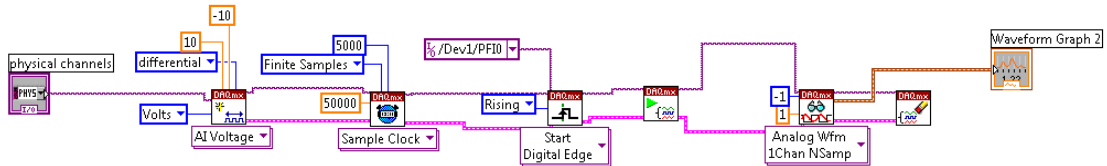


Figura 4.12 – Subprograma para configuração da aquisição de dados

Dentro do sub-programa, existe um bloco *Sub-VI DAQmx Create Channel (AI-Voltage-Basic)* (ver figura 4.13) onde foram seleccionados os seguintes parâmetros:

- Entrada analógica indicada pelo programa principal;
- Entrada do tipo diferencial;
- Unidade de medida em Volt;
- Limites mínimo e máximo da entrada, respectivamente, -10 V a +10 V.

De seguida, a saída deste bloco é ligada a um bloco *DAQmx Timing (Sample Clock)* (ver figura 4.13), o qual é responsável pela temporização da aquisição. Assim sendo, escolheram-se os seguintes parâmetros:

- Aquisição de um número fixo de amostras;
- Aquisição de 5000 amostras (N);
- Frequência máxima de amostragem (f_s) de 50 kHz.

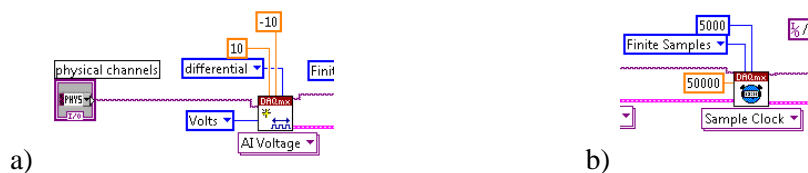


Figura 4.13 – Blocos: a) *Sub-VI DAQmx Create Channel (AI-Voltage-Basic)*; b) *DAQmx Timing (Sample Clock)*

Após estes blocos, no subprograma existe um bloco *DAQmx Start Trigger (Digital Edge)* (ver figura 4.14) onde se configura a detecção do sinal externo (*trigger*) com os seguintes parâmetros:

- Modo de operação digital;
- Flanco ascendente;
- Endereço de entrada do sinal externo PFI0.

Desta forma, a aquisição de sinal será sincronizada com o sinal externo de *trigger*, ou seja, a aquisição só terá início quando ocorrer a transição de flanco ascendente no sinal externo. Conforme já referido, consegue-se assim sincronizar os sinais adquiridos com a forma de onda da tensão da fase 1 da instalação eléctrica.

Posteriormente, existe um bloco *DAQmx Start Task* para dar início à tarefa de aquisição com as configurações acima especificadas. Outro bloco, *DAQmx Read*, impõe a leitura de todas as amostras disponíveis e produz uma imagem do sinal adquirido, na forma de um gráfico (*Waveform Graph*). Finalmente, o bloco *DAQmx Clear Task* termina a tarefa de aquisição. Estes blocos encontram-se ilustrados na figura 4.14 b).

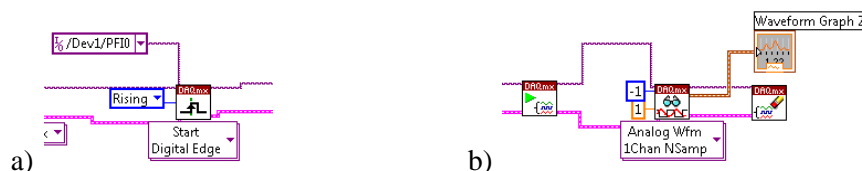


Figura 4.14 – Blocos: a) *DAQmx Start Trigger (Digital Edge)*; b) Restantes blocos

No programa principal, o bloco correspondente ao subprograma acima é duplicado e cada um dos dois blocos realiza a aquisição na entrada que lhe é designada. Assim sendo, tratam-se da entrada analógica de sinal de tensão AI0 (*Analog Input 0*) e da entrada analógica de sinal de corrente AI1 (*Analog Input 1*) (ver figura 4.15).

Estas operações realizam-se sequencialmente dentro de uma estrutura do tipo *Flat Sequence Structure* representada na figura 4.15. Este tipo de estrutura garante que em primeiro lugar é realizada a aquisição do sinal de tensão e de seguida obtém-se o sinal de corrente, de forma a evitar conflitos de acesso à carta de aquisição em simultâneo.

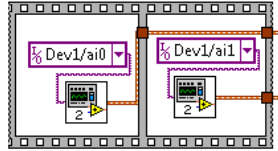


Figura 4.15 – Estrutura *Sequence Structure*

Conforme já descrito no dimensionamento dos transdutores, o campo de medição de tensão em valor eficaz é de 250 V e o ganho de conversão tensão/tensão é de 20 mV/V (5 V/250 V). Por outras palavras, à saída do transdutor de tensão de sinal existirá uma tensão de 20 mV por cada 1 V presente na sua entrada.

Já o campo de medição de corrente em valor eficaz é de 5 A e o seu ganho de conversão corrente/tensão é de 1000 mV/A (5 V/5 A), ou seja, por cada 1 A de corrente existirá uma tensão de 1000 mV à saída do transdutor de corrente.

Face ao ganho de conversão tensão/tensão de 20 mV/V, foi necessário implementar no diagrama de blocos um ganho de valor 50 para o sinal da tensão observado no LabVIEW corresponder ao valor real. No caso do sinal de corrente, considerando que cada 1000 mV observados correspondem a 1 A de corrente na entrada no transdutor, considera-se um ganho unitário.

De acordo com o referido no subcapítulo 3.2.1, a normalização define limites de corrente até à 40.^a harmónica, correspondente a 2000 Hz. Desta forma, pretende-se analisar sinais com uma frequência máxima de 2000 Hz. Segundo o teorema de Nyquist, a frequência de amostragem escolhida para a aquisição dos sinais deve ser, teoricamente, maior ou igual ao dobro da frequência máxima presente no sinal a adquirir (f_{in}), o que no presente caso corresponde a $f_s \geq 4000$ Hz.

Tendo sido escolhida uma frequência de amostragem $f_s = 50$ kHz, cumprem-se os requisitos enumerados no parágrafo anterior. Assim sendo, pode ser calculado o factor de sobreamostragem, o qual consiste no rácio entre a frequência de amostragem f_s e o dobro da frequência máxima a analisar, f_{in} . Então, o factor de amostragem é dado por:

$$\frac{f_s}{f_{in}} = \frac{50000}{4000} = 12,5 \quad (4.4)$$

Conforme indicado no subcapítulo 3.2.2 e de acordo com a norma IEC 61000-4-7, no presente trabalho optou-se por um tempo de aquisição T de 0,1 s. Tendo em conta a frequência de amostragem $f_s = 50$ kHz e o tempo de aquisição $T = 0,1$ s, o número de amostras a adquirir, N , pode ser determinado através da seguinte expressão [17]:

$$N = T f_s = 0,1 \times 50000 = 5000 \quad (4.5)$$

Tendo em conta que os sinais de tensão e de corrente pertencentes ao domínio do tempo serão decompostos em frequência através da transformada rápida de Fourier (FFT), com os parâmetros acima enunciados a resolução em frequência será a seguinte [18]:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{50000}{5000} = 10 \text{ Hz} \quad (4.6)$$

Assim sendo, segundo o teorema de Nyquist o número total de pontos utilizáveis com esta resolução resulta da seguinte expressão [18]:

$$\frac{N}{2} = \frac{5000}{2} = 2500 \quad (4.7)$$

Considerando estes 2500 valores com intervalos de frequências de 10 Hz, o primeiro valor corresponderá à componente contínua e o último valor será o correspondente à seguinte frequência [18]:

$$\frac{f_s}{2} - \frac{f_s}{N} = \frac{50000}{2} - \frac{50000}{5000} = 24990 \text{ Hz} \quad (4.8)$$

As formas de onda de tensão e corrente podem ser definidas por uma soma infinita de termos harmónicos, conforme indicado em (1.1) no capítulo de Definições.

A decomposição das formas de onda em série de Fourier é efectuada no LabVIEW pelos blocos *Spectral Measurements* (ver figura 4.16). Estes contêm um algoritmo da transformada rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) que permite obter os valores eficazes U_{nh} e I_{nh} assim como os ângulos α_{unh} e α_{inh} . Nos blocos *Spectral Measurements* foi seleccionada uma janela rectangular.

A determinação dos valores eficazes totais de tensão e corrente, U e I , é realizada pelos blocos *Amplitude and Level Measurements* (ver figura 4.16), sendo os valores eficazes totais definidos pelas expressões (1.2) e (1.3) enunciadas no capítulo de definições. Conhecendo estes dois últimos valores, o seu produto resulta na potência aparente S , expressa pela equação (1.4).

Para a obtenção dos valores eficazes da componente fundamental de tensão e corrente, respectivamente U_{1h} e I_{1h} , recorreu-se ao bloco *Tone Measurements* (ver figura 4.16), o qual permite determinar a componente de uma frequência específica, correspondente neste caso a 50 Hz. Adicionalmente, o bloco determina também os ângulos α_{u1h} e α_{i1h} . A diferença entre estes dois ângulos indica o desfasamento entre tensão e corrente para a componente fundamental, φ_{1h} , de acordo com a equação (1.7).

Este último cálculo do ângulo φ_{1h} e a determinação da potência aparente S foram realizados através de uma estrutura *Formula Node*, a qual permite o cálculo de fórmulas matemáticas, conforme representado na figura 4.16:

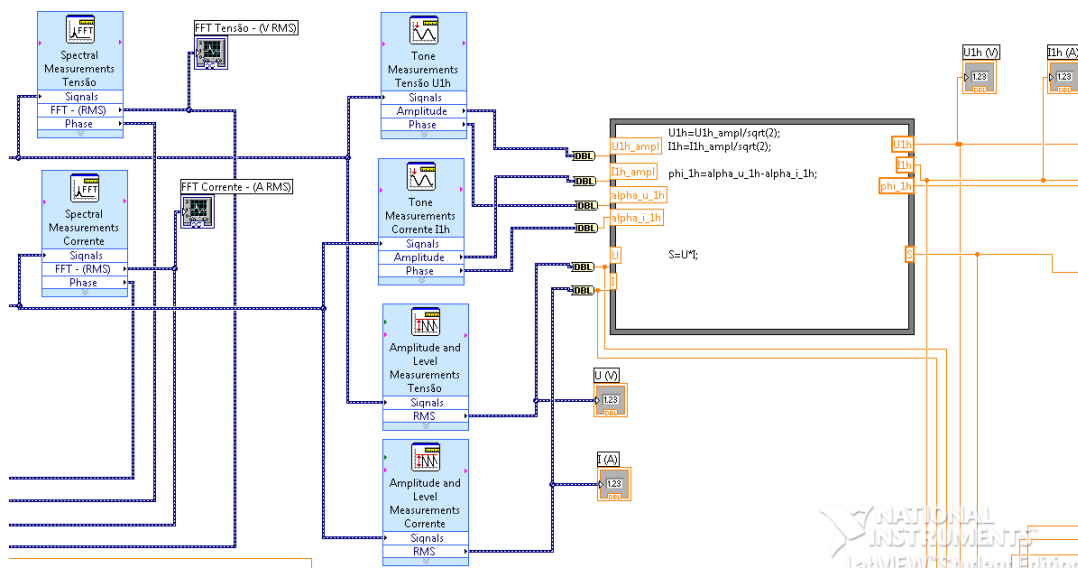


Figura 4.16 – Blocos para realização da FFT, determinação de U e I , U_{1h} e I_{1h} , cálculos da potência aparente S e do ângulo φ_{1h}

Conhecendo já os valores de U_{1h} , I_{1h} e φ_{1h} , é possível determinar as potências activa P_{1h} , reactiva Q_{1h} e aparente S_{1h} associadas à componente fundamental, realizadas através de uma estrutura *Formula Node* (ver figura 4.17) e recorrendo às expressões (1.10), (1.11) e (1.5). De igual forma, a potência deformante D pode ser calculada através da equação (1.15).

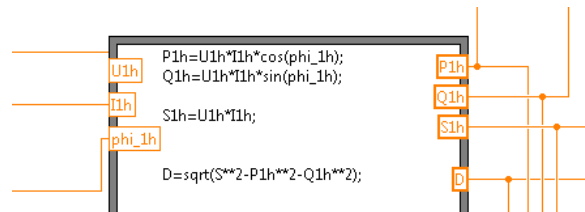


Figura 4.17 – Estrutura *Formula Node* para cálculo de potências associadas à componente fundamental e cálculo da potência deformante, D

Já conhecendo os valores eficazes U_{nh} e I_{nh} assim como os ângulos α_{unh} e α_{inh} , é possível calcular o desfasamento entre tensão e corrente para cada termo de igual ordem, φ_{nh} , segundo a expressão (1.6).

De seguida obtêm-se as potências activa P_{nh} e reactiva Q_{nh} para cada termo harmónico, dadas pelas equações (1.8) e (1.9), respectivamente. Para determinar a potência aparente S_{nh} para cada termo harmónico recorre-se à equação (1.12).

As potências totais activa, P , e reactiva, Q , são determinadas pelo somatório das várias potências associadas às harmónicas P_{nh} e Q_{nh} , segundo as expressões (1.13) e (1.14).

As potências acima descritas P_{nh} , Q_{nh} , S_{nh} , P e Q foram calculadas recorrendo a vários blocos do LabVIEW que realizam operações matemáticas, tal como evidenciado na seguinte figura:

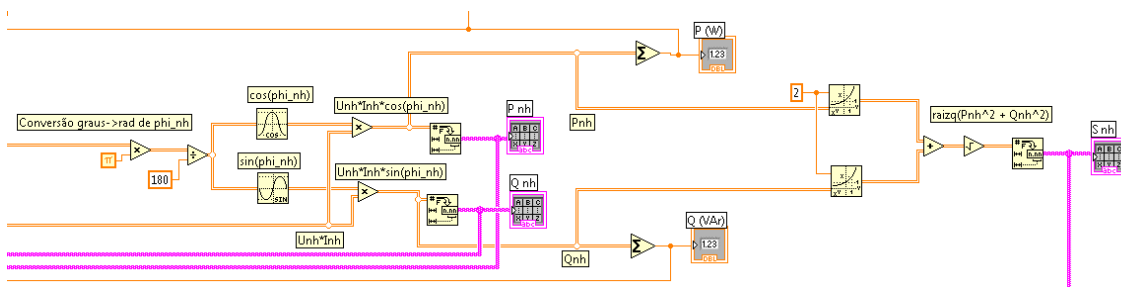


Figura 4.18 – Determinação das potências P_{nh} , Q_{nh} , S_{nh} , P e Q

Conhecendo agora a potência activa total P , é possível determinar o Factor de Potência, PF (PF – *Power Factor*) que consiste na relação entre as potências totais activa e aparente, calculado pela expressão (1.16).

Outro parâmetro a calcular pelo programa é o Factor de Desfasamento, FD (DPF – *Displacement Power Factor*), o qual traduz o desfasamento associado à componente fundamental, expresso por (1.17).

Estes dois últimos parâmetros, PF e DPF, são calculados através de uma estrutura *Formula Node* ilustrada na seguinte figura:

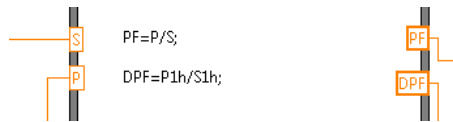


Figura 4.19 – Estrutura *Formula Node* para cálculo do Factor de Potência e do Factor de Desfasamento

Os valores de THD indicados no painel frontal são calculados recorrendo ao bloco do LabVIEW designado por *Distortion Measurements* (ver figura 4.20), considerando o conteúdo harmónico até à 40.^a harmónica. As Distorções Harmónicas Totais de Tensão (THD_U) e de Corrente (THD_I) são definidas em percentagens, respectivamente, pelas expressões (1.18) e (1.19).

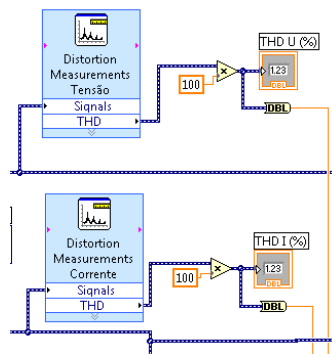


Figura 4.20 – Blocos *Distortion Measurements* para cálculo da THD

Para efectuar a correcção da deriva de zero do transdutor de corrente LA 25-NP, fenómeno já descrito anteriormente no painel frontal, foi utilizado o bloco *Amplitude and Level Measurements* para quantificar a componente contínua da corrente. Posteriormente, o valor de correcção manualmente introduzido pelo utilizador no painel frontal é somado ao sinal de corrente original através de um ponto de soma, podendo assim anular-se a componente de corrente contínua, ver figura 4.21:

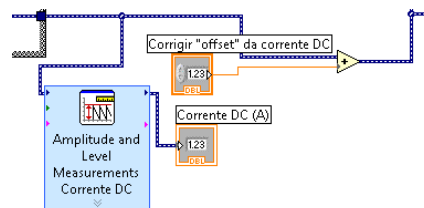


Figura 4.21 – Correção manual da deriva de zero do transdutor de corrente

4.3.3. Validação do *software* desenvolvido em LabVIEW - comparação com MATLAB

Para efeitos de validação dos resultados produzidos pelo programa elaborado em LabVIEW, nomeadamente a decomposição em série de Fourier da forma de onda da corrente, utilizar-se-á o *software* MATLAB para comparação de resultados.

Desta forma, será simulado um sinal de corrente com uma forma de onda do tipo dente de serra, sendo a série de Fourier de uma onda dente de serra expressa por, $f(t)$:

$$f(t) = \frac{A}{2} - \frac{A}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \text{sen}(n\omega t) \quad (4.9)$$

Na expressão anterior, o parâmetro A representa a amplitude da forma de onda e f é a frequência em Hertz. É de salientar que a onda dente de serra possui todos os termos harmónicos, pares e ímpares, sendo assim adequada para averiguar a validade da decomposição em série de Fourier realizada por plataformas de *software* diferentes.

Considera-se então uma onda dente de serra com uma amplitude arbitrária $A = 0,4$, uma frequência $f = 50$ Hz e um intervalo temporal $t = 0,1$ s. A introdução destes parâmetros no LabVIEW é feita recorrendo ao bloco *Simulate Signal*, enquanto no MATLAB é realizada com as seguintes instruções:

```
f=50;  
t=0:1e-6:0.1;  
s=0.2+0.2*sawtooth(2*pi*f*t);
```

O conjunto completo das instruções implementadas no MATLAB/Simulink encontra-se no Anexo 3.

Na figura seguinte apresenta-se a representação gráfica da forma de onda obtida pelo MATLAB, a qual é semelhante nas duas plataformas de *software*:

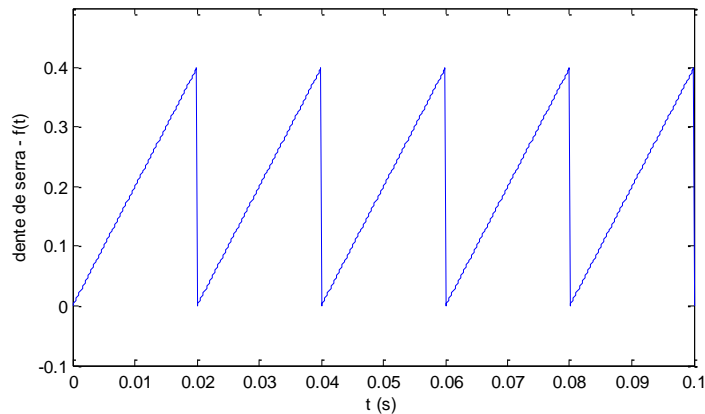


Figura 4.22 – Forma de onda do tipo de serra

Pretende-se agora determinar as amplitudes harmónicas desta forma de onda recorrendo à decomposição em série de Fourier através do LabVIEW e do MATLAB, até à harmónica de ordem 40. Por análise da figura 4.22, é esperado também um valor médio de 0,2.

Na seguinte tabela apresentam-se as amplitudes de cada harmónica obtidas no LabVIEW e no MATLAB:

Tabela 4.1 – Amplitudes harmónicas da onda dente de serra obtidas em LabVIEW e MATLAB

| <i>n</i> | LabVIEW | MATLAB |
|---------------|----------|----------|
| 0 (DC) | 0,200200 | 0,199990 |
| 1 | 0,127323 | 0,127337 |
| 2 | 0,063661 | 0,063668 |
| 3 | 0,042441 | 0,042446 |
| 4 | 0,031830 | 0,031834 |
| 5 | 0,025463 | 0,025467 |
| 6 | 0,021219 | 0,021223 |
| 7 | 0,018187 | 0,018191 |
| 8 | 0,015913 | 0,015917 |
| 9 | 0,014144 | 0,014149 |
| 10 | 0,012728 | 0,012734 |
| 11 | 0,011571 | 0,011576 |
| 12 | 0,010605 | 0,010611 |
| 13 | 0,009789 | 0,009795 |
| 14 | 0,009089 | 0,009095 |
| 15 | 0,008482 | 0,008489 |
| 16 | 0,007952 | 0,007959 |
| 17 | 0,007483 | 0,007490 |
| 18 | 0,007067 | 0,007074 |
| 19 | 0,006693 | 0,006702 |
| 20 | 0,006358 | 0,006367 |
| 21 | 0,006054 | 0,006064 |
| 22 | 0,005778 | 0,005788 |
| 23 | 0,005527 | 0,005536 |
| 24 | 0,005296 | 0,005306 |
| 25 | 0,005083 | 0,005093 |
| 26 | 0,004888 | 0,004898 |
| 27 | 0,004705 | 0,004716 |
| 28 | 0,004537 | 0,004548 |
| 29 | 0,004378 | 0,004391 |
| 30 | 0,004233 | 0,004245 |
| 31 | 0,004096 | 0,004108 |
| 32 | 0,003967 | 0,003979 |
| 33 | 0,003845 | 0,003859 |
| 34 | 0,003732 | 0,003745 |
| 35 | 0,003625 | 0,003638 |
| 36 | 0,003523 | 0,003537 |
| 37 | 0,003427 | 0,003442 |
| 38 | 0,003336 | 0,003351 |
| 39 | 0,003250 | 0,003265 |
| 40 | 0,003168 | 0,003183 |

Conforme se pode observar pelos valores presentes na tabela 4.1, para uma forma de onda do tipo dente de serra todas as harmônicas estão presentes. O valor médio, correspondente à componente contínua, também se encontra presente e com um valor conforme o esperado. De uma forma geral, os valores médios e as amplitudes de cada harmônica apresentam apenas diferenças mínimas entre os valores produzidos pelo LabVIEW e pelo MATLAB.

Na figura seguinte encontra-se uma representação gráfica dos valores presentes na tabela 4.1, contendo as amplitudes de cada harmônica da forma de onda dente de serra, obtidas pelos dois métodos:

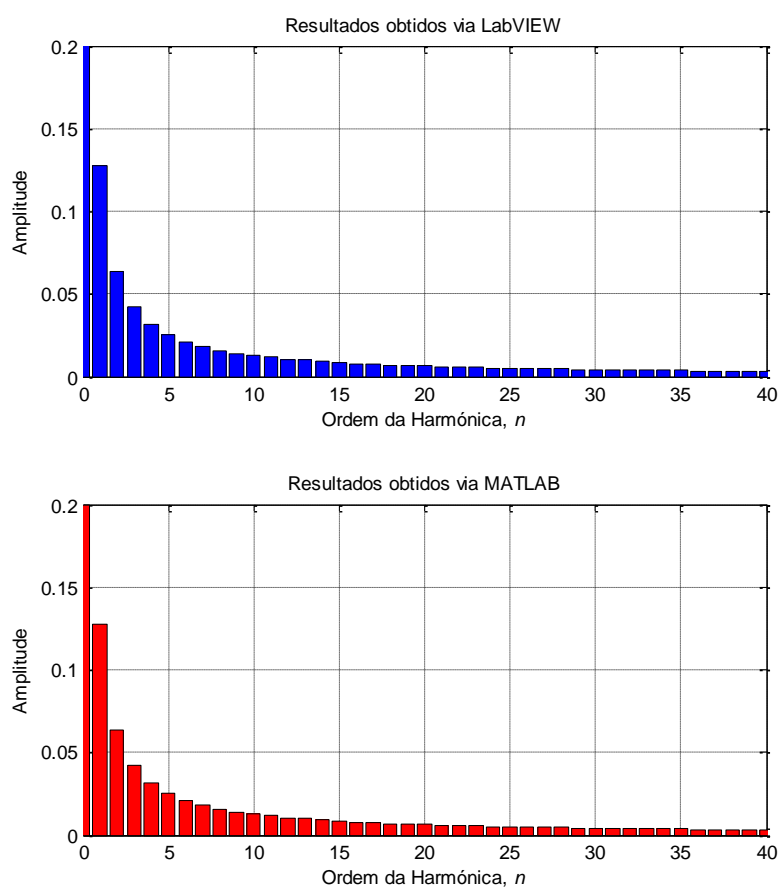


Figura 4.23 – Espectros harmônicos da onda dente de serra obtidos em LabVIEW e MATLAB

Tal como já evidenciado na tabela 4.1, os espectros harmônicos ilustrados na figura anterior são praticamente indistinguíveis.

Desta forma, apesar de o LabVIEW ser uma ferramenta computacional menos divulgada face ao MATLAB, os valores obtidos nos dois *software* são muito similares e conclui-se que o programa desenvolvido através do LabVIEW apresenta resultados válidos.

5. Resultados Experimentais

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios experimentais realizados com o *hardware* e *software* descrito no capítulo 4.

Em primeiro lugar, no subcapítulo 5.1 foram realizados ensaios em seis lâmpadas distintas com o objectivo de identificar o condensador utilizado em cada uma delas e conhecer o *ripple* existente no lado contínuo do rectificador. Para tal, foi necessário abrir o invólucro da base de cada lâmpada, o qual contém o circuito eléctrico já abordado no subcapítulo 3.3, e medir directamente a tensão aos terminais do condensador com a lâmpada em funcionamento.



Figura 5.1 – Fotografia do circuito eléctrico e do condensador de uma lâmpada fluorescente compacta

Posteriormente, no capítulo 5.2 realizaram-se ensaios em todas as lâmpadas (ver tabela 3.1), de forma individual, numa instalação eléctrica monofásica. O objectivo destes ensaios consiste em verificar o cumprimento da norma IEC 61000-3-2 sobre compatibilidade electromagnética, ou seja, as restrições impostas à produção de correntes harmónicas por parte de equipamentos ligados à rede de distribuição de energia eléctrica.

Conforme já abordado no subcapítulo 3.2, a norma IEC 61000-3-2 implica o cumprimento de um de dois conjuntos de regras. O primeiro conjunto foi enunciado no subcapítulo 3.2.1.1 e no subcapítulo seguinte, 3.2.1.2, encontra-se descrito o segundo conjunto de requisitos. Salienta-se novamente que as lâmpadas em ensaio podem

cumprir apenas um dos conjuntos de regras, não sendo obrigatório o cumprimento dos dois conjuntos.

Além dos ensaios individuais a cada lâmpada, no capítulo 5.2 foram ainda realizados outros três ensaios com várias lâmpadas em paralelo, simultaneamente ligadas na mesma fase da instalação eléctrica. No primeiro ensaio, foi utilizada uma lâmpada compacta fluorescente em paralelo com uma lâmpada de LED, respectivamente as lâmpadas de referências 3 e 9 (ver tabela 3.1). Já no segundo ensaio, utilizou-se a mesma lâmpada fluorescente compacta de referência 3, mas desta vez em paralelo com outra lâmpada de LED, a lâmpada de referência 10. O terceiro ensaio consiste na ligação simultânea de seis lâmpadas compactas fluorescentes em paralelo. Estes três ensaios têm como objectivo a análise do conteúdo harmónico produzido pelas várias lâmpadas em paralelo e ligadas numa única fase, uma situação que é frequente nas instalações eléctricas.

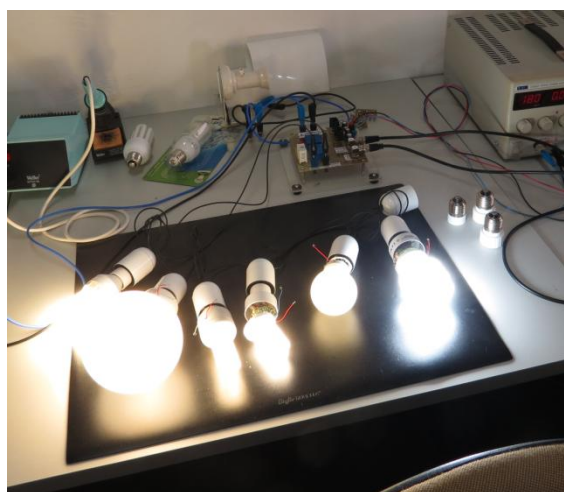


Figura 5.2 – Fotografia do ensaio experimental das seis lâmpadas fluorescentes compactas em paralelo

Finalmente, no capítulo 5.3 foi realizado um ensaio numa instalação eléctrica trifásica com condutor de neutro. Procurou-se distribuir as lâmpadas por cada fase em função da sua potência, isto é, tentou-se criar um sistema trifásico com carga equilibrada, dentro da medida do possível. A distribuição das lâmpadas foi a seguinte: à fase 1 ligou-se a lâmpada de referência 1 (23W), à fase 2 ligou-se a lâmpada 5 (20W), enquanto que na fase 3 se ligaram as lâmpadas de referências 3 e 11 ($11 + 8 = 19W$). Este ensaio tem como principal objectivo a análise da corrente de neutro numa instalação eléctrica onde se encontram ligadas cargas não lineares com elevado conteúdo harmónico.

Exceptuando os ensaios para determinação do *ripple*, nos restantes ensaios foram adquiridos dados através do LabVIEW, os quais foram exportados em ficheiros CSV e tratados posteriormente recorrendo ao MATLAB e ao Excel. A medição dos ângulos estipulados no segundo conjunto de regras é efectuada via MATLAB, segundo o código que consta do Anexo 4.

Nas páginas seguintes apresentam-se os resultados obtidos em cada ensaio. Caso seja possível, os resultados experimentais serão acompanhados de simulação. No final do subcapítulo 5.1 é explicado o motivo pelo qual apenas se poderão obter resultados de simulação para algumas lâmpadas. Os detalhes do modelo de simulação implementado em MATLAB/Simulink encontram-se no Anexo 1.

Após as páginas referentes a cada ensaio, apresentam-se algumas tabelas com um resumo dos resultados obtidos.

5.1. Ensaio de determinação do *ripple*

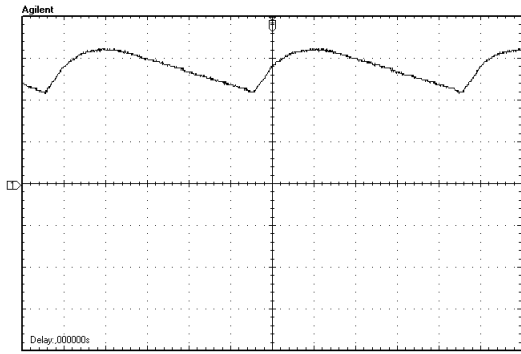
Neste subcapítulo apresentam-se os resultados dos ensaios realizados em seis lâmpadas diferentes, de referências 1, 3, 4, 5, 6 e 8 (consultar tabela 3.1). Conforme já referido, pretende-se identificar o condensador utilizado em cada lâmpada e medir a tensão aos seus terminais, a qual é igual à tensão no lado contínuo do rectificador.

Para a medição de tensão foi utilizado um osciloscópio digital Agilent Technologies DSO 3062A e uma ponta de prova diferencial Langlois ISOL 601 com um factor de atenuação de 1/200, ligada directamente aos terminais do condensador presente em cada lâmpada. O osciloscópio foi também ligado a um computador pessoal equipado com o *software* Scope Connect da Agilent Technologies para o registo das formas de onda e valores.

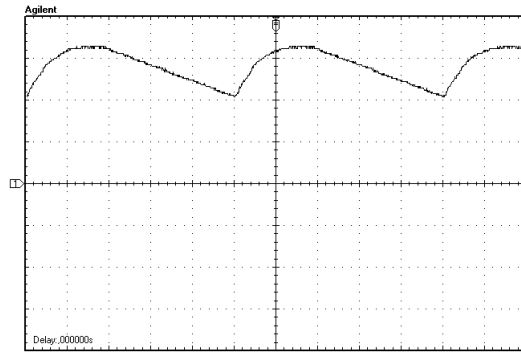
O objectivo destes ensaios consiste em verificar se, numa amostra de seis lâmpadas de características distintas, o fabricante das lâmpadas estipula um valor padrão de *ripple* para a tensão no lado contínuo do rectificador.

Adicionalmente, no subcapítulo 3.3.2 considerou-se uma aproximação para a determinação teórica dos valores do condensador de cada lâmpada. Desta forma, pretende-se ainda comparar os resultados produzidos por esta aproximação com os condensadores utilizados nas lâmpadas em análise.

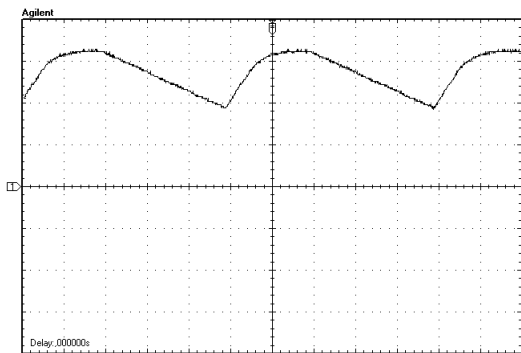
Na figura 5.3 apresentam-se as formas de onda da tensão no condensador das lâmpadas 1, 3, 4, 5, 6 e 8, retiradas do osciloscópio digital.



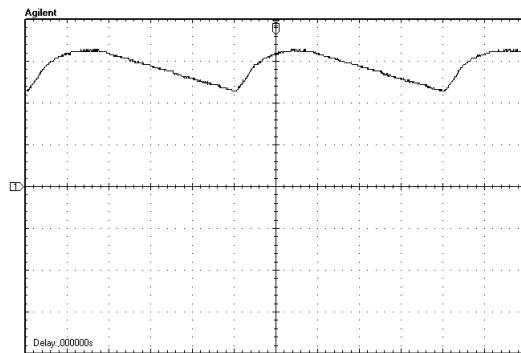
a) Lâmpada 1 (23W)



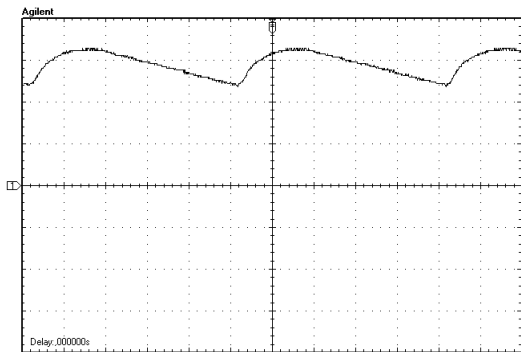
b) Lâmpada 3 (11W)



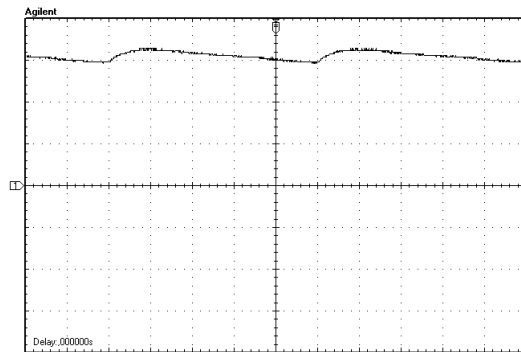
c) Lâmpada 4 (5W)



d) Lâmpada 5 (20W)



e) Lâmpada 6 (8W)



f) Lâmpada 8 (8W)

Figura 5.3 – Formas de onda da tensão no condensador: a) Lâmpada 1, b) Lâmpada 3; c) Lâmpada 4; d) Lâmpada 5; e) Lâmpada 6; f) Lâmpada 8

Ganho vertical: 100 V/div.

Ganho horizontal: 2 ms/div.

Do osciloscópio retiraram-se também os valores de tensão eficaz U_{rms} , tensão média $U_{méd}$, tensão máxima $U_{máx}$, tensão mínima $U_{mín}$ e tensão de *ripple* ΔU medidos aos terminais do condensador de cada lâmpada, apresentados na seguinte tabela:

Tabela 5.1 – Resumo dos valores de tensões medidos no condensador de cada lâmpada

| Ref. | Modelo | U_{rms} (V) | $U_{méd}$ (V) | $U_{máx}$ (V) | $U_{mín}$ (V) | ΔU (V) | ΔU (%) |
|------|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | DULUXSTAR MINI TWIST (23W) | 282,8 | 281,0 | 324 | 228 | 96 | 29,63 |
| 3 | DULUX EL LONGLIFE (11W) | 279,8 | 277,2 | 324 | 200 | 124 | 38,27 |
| 4 | DULUX SUPERSTAR CLASSIC A (5W) | 274,0 | 270,6 | 324 | 184 | 140 | 43,21 |
| 5 | DULUX EL LONGLIFE (20W) | 284,8 | 283,0 | 324 | 220 | 104 | 32,10 |
| 6 | DULUXSTAR (8W) | 288,8 | 287,6 | 324 | 236 | 88 | 27,16 |
| 8 | DULUX EL ECONOMY (8W) | 308,4 | 308,2 | 324 | 288 | 36 | 11,11 |

Analisando a figura e a tabela anteriores, especialmente o *ripple* expresso em percentagem, verifica-se que existem diferenças consideráveis entre as várias lâmpadas ensaiadas, dado que o *ripple* observado varia aproximadamente entre os 10 e os 45%.

Embora no subcapítulo 3.3.2 tenha sido considerado um *ripple* de 30% no lado contínuo do retificador, o qual se encontra dentro da gama de valores observada experimentalmente, face aos resultados obtidos conclui-se que não é possível atribuir um valor padrão de *ripple* para as lâmpadas ensaiadas.

Na tabela seguinte registam-se as características dos condensadores presentes nas seis lâmpadas em análise:

Tabela 5.2 – Capacitância e tensão nominal do condensador utilizado em cada lâmpada

| Ref. | Modelo | Condensador |
|------|--------------------------------|---------------------|
| 1 | DULUXSTAR MINI TWIST (23W) | 5,6 μ F / 400 V |
| 3 | DULUX EL LONGLIFE (11W) | 2,7 μ F / 350 V |
| 4 | DULUX SUPERSTAR CLASSIC A (5W) | 1 μ F / 360 V |
| 5 | DULUX EL LONGLIFE (20W) | 4,7 μ F / 360 V |
| 6 | DULUXSTAR (8W) | 2,2 μ F / 400 V |
| 8 | DULUX EL ECONOMY (8W) | 4,7 μ F / 350 V |

Pretende-se agora comparar estes valores de condensadores com os valores calculados teoricamente através da aproximação descrita no subcapítulo 3.3.2, mais especificamente recorrendo às equações (3.20) e (3.24):

$$R \cong \frac{U_{rms}^2}{P} \quad (3.20)$$

$$C_{teórico} \cong \frac{U_{rms} t_{off}}{R \Delta U} \quad (3.24)$$

Desta forma, recorrendo aos valores da tabela 5.1 medidos experimentalmente e às duas equações anteriores obtêm-se os valores teóricos de condensadores para cada lâmpada. Na tabela seguinte representam-se estes valores teóricos, assim como os valores de condensadores verificados experimentalmente:

Tabela 5.3 – Valores dos condensadores calculados teoricamente e valores reais do condensador para cada lâmpada ensaiada

| Ref. | Modelo | C teórico (µF) | C real (µF) |
|------|--------------------------------|----------------|-------------|
| 1 | DULUXSTAR MINI TWIST (23W) | 8,7 | 5,6 |
| 3 | DULUX EL LONGLIFE (11W) | 3,4 | 2,7 |
| 4 | DULUX SUPERSTAR CLASSIC A (5W) | 1,4 | 1 |
| 5 | DULUX EL LONGLIFE (20W) | 7,1 | 4,7 |
| 6 | DULUXSTAR (8W) | 3,2 | 2,2 |
| 8 | DULUX EL ECONOMY (8W) | 7,3 | 4,7 |

Comparando os valores teóricos com os valores de condensadores utilizados em cada lâmpada verifica-se que existe alguma disparidade e, conseqüentemente, conclui-se que a aproximação considerada no capítulo 3.3.2 não é satisfatória para a determinação teórica dos valores do condensador. Desta forma, pela aproximação referida não será possível determinar teoricamente o condensador presente numa dada lâmpada conhecendo apenas a sua potência activa.

Assim sendo, nas páginas seguintes só serão apresentados resultados de simulação para ensaios que envolvam as seis lâmpadas (ver tabela 5.3) cujo condensador real é conhecido, dado que para as restantes lâmpadas não é possível determinar teoricamente o valor do condensador sem a realização de ensaios experimentais.

Para efeitos de simulação com o modelo MATLAB/Simulink que consta do Anexo 1, consideraram-se os valores reais dos condensadores que constam da segunda coluna da tabela 5.3. As resistências equivalentes das várias lâmpadas foram calculadas através da equação (3.20), considerando a tensão eficaz U_{rms} e a potência activa P obtidas nos ensaios experimentais. Em resumo, na seguinte tabela apresentam-se os parâmetros utilizados para simulação:

Tabela 5.4 – Parâmetros R e C utilizados nas simulações em MATLAB/Simulink

| Ref. | Modelo | C (μF) | R (Ω) |
|-------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 1 | DULUXSTAR MINI TWIST (23W) | 5,6 | 3846 |
| 3 | DULUX EL LONGLIFE (11W) | 2,7 | 6138 |
| 4 | DULUX SUPERSTAR CLASSIC A (5W) | 1 | 12240 |
| 5 | DULUX EL LONGLIFE (20W) | 4,7 | 4135 |
| 6 | DULUXSTAR (8W) | 2,2 | 10608 |
| 8 | DULUX EL ECONOMY (8W) | 4,7 | 13466 |

5.2. Resultados experimentais numa instalação eléctrica monofásica

Nas páginas seguintes apresentam-se os resultados dos ensaios experimentais realizados numa instalação eléctrica monofásica, nomeadamente os ensaios individuais a cada lâmpada e os ensaios com várias lâmpadas em paralelo alimentadas pela mesma fase.

São indicados os valores eficazes das correntes obtidas, nomeadamente a corrente total I , a corrente da componente fundamental I_{1h} e as correntes das harmónicas ímpares I_{nh} .

É ilustrado também um período das formas de onda de tensão e de corrente, assim como um gráfico de barras do espectro harmónico da corrente observado.

É ainda verificado o cumprimento dos requisitos da norma IEC 61000-3-2. A medição dos ângulos estipulados no segundo conjunto de regras é efectuada via MATLAB, segundo o código que consta do Anexo 4.

5.2.1. Lâmpada 1: Duluxstar Mini Twist 23W E27

Tabela 5.5 – Lâmpada 1: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

$I = 146,53 \text{ mA}$

| Ordem da harmônica, n | Valores medidos nos ensaios experimentais | | | Norma IEC 61000-3-2 | |
|-------------------------|---|-----------------------|------------------|--|-------------------------------|
| | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) | Corrente I_{nh} máxima para $P = 23W$ (mA) | Cumpre a corrente máxima? S/N |
| 1 | 98,92 | 100,00 | 67,50 | - | - |
| 3 | 75,15 | 75,97 | 51,28 | 78,20 | SIM |
| 5 | 46,36 | 46,87 | 31,64 | 43,70 | NÃO |
| 7 | 36,10 | 36,50 | 24,64 | 23,00 | NÃO |
| 9 | 31,38 | 31,73 | 21,42 | 11,50 | NÃO |
| 11 | 19,62 | 19,83 | 13,39 | 8,05 | NÃO |
| 13 | 11,54 | 11,67 | 7,88 | 6,81 | NÃO |
| 15 | 10,17 | 10,28 | 6,94 | 5,90 | NÃO |
| 17 | 6,26 | 6,32 | 4,27 | 5,21 | NÃO |
| 19 | 8,14 | 8,23 | 5,56 | 4,66 | NÃO |
| 21 | 10,13 | 10,24 | 6,91 | 4,22 | NÃO |
| 23 | 8,54 | 8,64 | 5,83 | 3,85 | NÃO |
| 25 | 7,98 | 8,07 | 5,45 | 3,54 | NÃO |
| 27 | 7,40 | 7,48 | 5,05 | 3,28 | NÃO |
| 29 | 4,83 | 4,89 | 3,30 | 3,05 | NÃO |
| 31 | 4,38 | 4,43 | 2,99 | 2,86 | NÃO |
| 33 | 4,68 | 4,73 | 3,19 | 2,68 | NÃO |
| 35 | 3,87 | 3,91 | 2,64 | 2,53 | NÃO |
| 37 | 4,13 | 4,18 | 2,82 | 2,39 | NÃO |
| 39 | 3,95 | 3,99 | 2,70 | 2,27 | NÃO |

Tabela 5.6 – Lâmpada 1: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

| Ordem da harmônica, n | I_{nh} (mA) | Porcentagem de I_{1h} | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
|-------------------------------------|---------------|-------------------------|---|-------------|
| 1 | 98,92 | - | - | - |
| 3 | 75,15 | 75,97% | $I_{3h} \leq 86\% \text{ de } I_{1h}$ | SIM |
| 5 | 46,36 | 46,87% | $I_{5h} \leq 61\% \text{ de } I_{1h}$ | SIM |
| Ângulos da forma de onda observados | | | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
| 44,46 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\leq 60^\circ$ | SIM |
| 55,08 | | | I_{p+} e I_{p-} ocorrem $\leq 65^\circ$ | SIM |
| 107,28 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\geq 90^\circ$ | SIM |

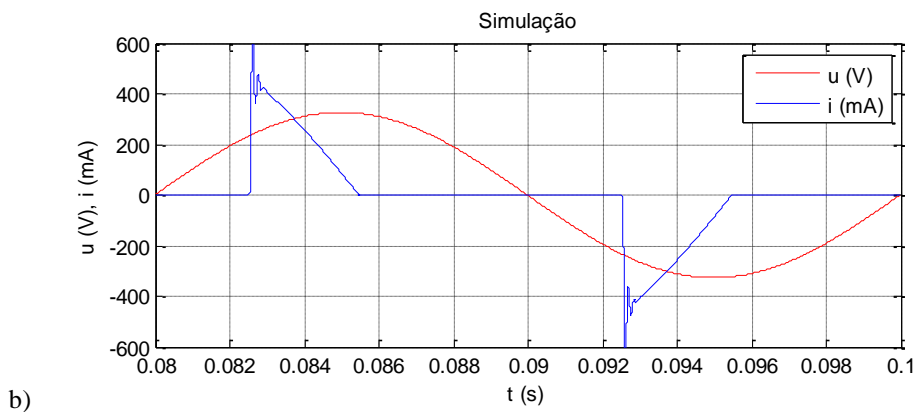
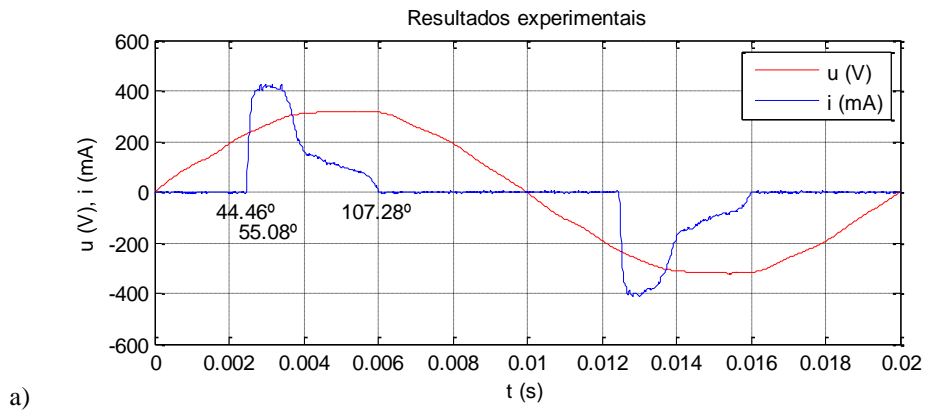


Figura 5.4 – Lâmpada 1: formas de onda de corrente e tensão observadas: a) resultados experimentais, b) simulação

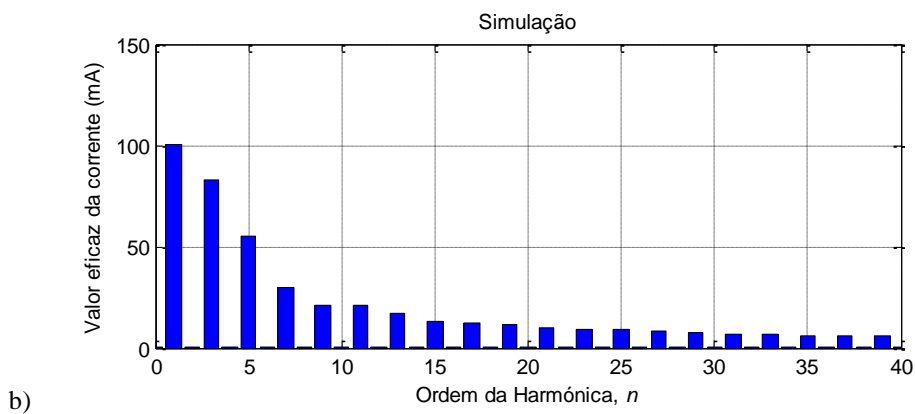
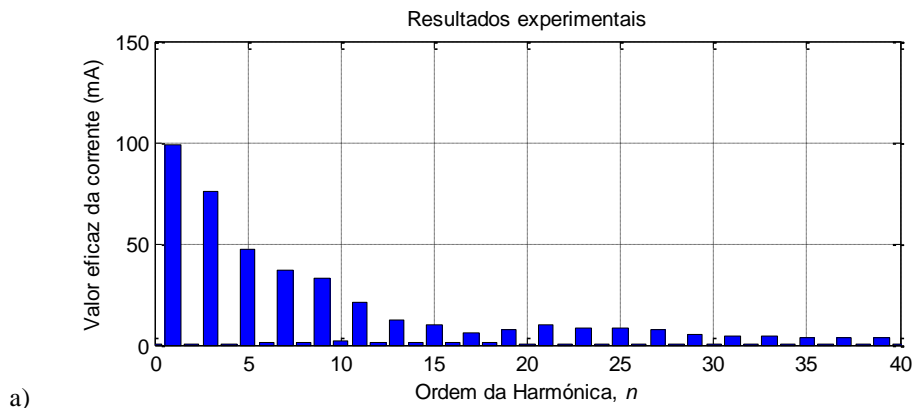


Figura 5.5 – Lâmpada 1: espectro harmônico da corrente: a) resultados experimentais, b) simulação

5.2.2. Lâmpada 2: Dulux Intelligent Sensor 15W E27

Tabela 5.7 – Lâmpada 2: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

I = 146,54 mA

| Ordem da harmónica, n | Valores medidos nos ensaios experimentais | | | Norma IEC 61000-3-2 | |
|-------------------------|---|-----------------------|------------------|--|-------------------------------|
| | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) | Corrente I_{nh} máxima para $P = 15W$ (mA) | Cumpre a corrente máxima? S/N |
| 1 | 71,82 | 100,00 | 67,50 | - | - |
| 3 | 52,31 | 75,97 | 51,28 | 51,00 | NÃO |
| 5 | 30,22 | 46,87 | 31,64 | 28,50 | NÃO |
| 7 | 22,98 | 36,50 | 24,64 | 15,00 | NÃO |
| 9 | 17,83 | 31,73 | 21,42 | 7,50 | NÃO |
| 11 | 8,75 | 19,83 | 13,39 | 5,25 | NÃO |
| 13 | 7,29 | 11,67 | 7,88 | 4,44 | NÃO |
| 15 | 6,64 | 10,28 | 6,94 | 3,85 | NÃO |
| 17 | 5,16 | 6,32 | 4,27 | 3,40 | NÃO |
| 19 | 6,64 | 8,23 | 5,56 | 3,04 | NÃO |
| 21 | 5,40 | 10,24 | 6,91 | 2,75 | NÃO |
| 23 | 3,82 | 8,64 | 5,83 | 2,51 | NÃO |
| 25 | 4,04 | 8,07 | 5,45 | 2,31 | NÃO |
| 27 | 2,93 | 7,48 | 5,05 | 2,14 | NÃO |
| 29 | 2,91 | 4,89 | 3,30 | 1,99 | NÃO |
| 31 | 3,12 | 4,43 | 2,99 | 1,86 | NÃO |
| 33 | 2,36 | 4,73 | 3,19 | 1,75 | NÃO |
| 35 | 2,53 | 3,91 | 2,64 | 1,65 | NÃO |
| 37 | 2,26 | 4,18 | 2,82 | 1,56 | NÃO |
| 39 | 1,72 | 3,99 | 2,70 | 1,48 | NÃO |

Tabela 5.8 – Lâmpada 2: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

| Ordem da harmónica, n | I_{nh} (mA) | Porcentagem de I_{1h} | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
|-------------------------------------|---------------|-------------------------|---|-------------|
| 1 | 71,82 | - | - | - |
| 3 | 52,31 | 72,83% | $I_{3h} \leq 86\%$ de I_{1h} | SIM |
| 5 | 30,22 | 42,08% | $I_{5h} \leq 61\%$ de I_{1h} | SIM |
| Ângulos da forma de onda observados | | | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
| 40,86 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\leq 60^\circ$ | SIM |
| 51,48 | | | I_{p+} e I_{p-} ocorrem $\leq 65^\circ$ | SIM |
| 107,82 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\geq 90^\circ$ | SIM |

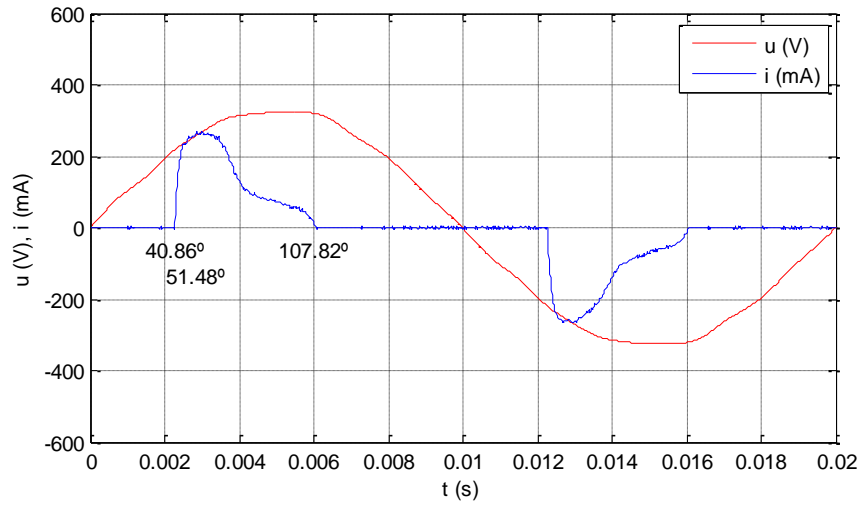


Figura 5.6 – Lâmpada 2: formas de onda de corrente e tensão observadas experimentalmente

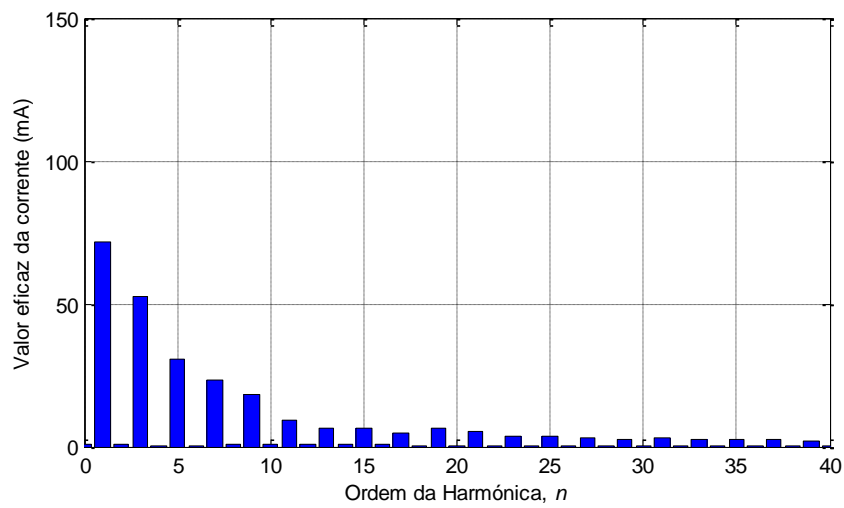


Figura 5.7 – Lâmpada 2: espectro harmónico da corrente obtido experimentalmente

5.2.3. Lâmpada 3: Dulux EL Longlife 11W E14

Tabela 5.9 – Lâmpada 3: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

I = 87,47 mA

| Ordem da harmónica, n | Valores medidos nos ensaios experimentais | | | Norma IEC 61000-3-2 | |
|-------------------------|---|-----------------------|------------------|--|-------------------------------|
| | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) | Corrente I_{nh} máxima para $P = 11W$ (mA) | Cumpre a corrente máxima? S/N |
| 1 | 62,15 | 100,00 | 71,05 | - | - |
| 3 | 43,55 | 70,07 | 49,79 | 37,40 | NÃO |
| 5 | 24,51 | 39,43 | 28,02 | 20,90 | NÃO |
| 7 | 20,66 | 33,25 | 23,62 | 11,00 | NÃO |
| 9 | 14,32 | 23,05 | 16,38 | 5,50 | NÃO |
| 11 | 6,28 | 10,10 | 7,18 | 3,85 | NÃO |
| 13 | 7,61 | 12,25 | 8,70 | 3,26 | NÃO |
| 15 | 6,82 | 10,97 | 7,79 | 2,82 | NÃO |
| 17 | 8,38 | 13,49 | 9,58 | 2,49 | NÃO |
| 19 | 8,99 | 14,46 | 10,28 | 2,23 | NÃO |
| 21 | 6,54 | 10,53 | 7,48 | 2,02 | NÃO |
| 23 | 5,67 | 9,12 | 6,48 | 1,84 | NÃO |
| 25 | 4,86 | 7,82 | 5,55 | 1,69 | NÃO |
| 27 | 4,38 | 7,04 | 5,00 | 1,57 | NÃO |
| 29 | 5,49 | 8,83 | 6,27 | 1,46 | NÃO |
| 31 | 4,91 | 7,89 | 5,61 | 1,37 | NÃO |
| 33 | 4,46 | 7,18 | 5,10 | 1,28 | NÃO |
| 35 | 4,34 | 6,98 | 4,96 | 1,21 | NÃO |
| 37 | 3,66 | 5,89 | 4,19 | 1,14 | NÃO |
| 39 | 3,83 | 6,17 | 4,38 | 1,09 | NÃO |

Tabela 5.10 – Lâmpada 3: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

| Ordem da harmónica, n | I_{nh} (mA) | Porcentagem de I_{1h} | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
|-------------------------------------|---------------|-------------------------|---|-------------|
| 1 | 62,15 | - | - | - |
| 3 | 43,55 | 70,07% | $I_{3h} \leq 86\%$ de I_{1h} | SIM |
| 5 | 24,51 | 39,43% | $I_{5h} \leq 61\%$ de I_{1h} | SIM |
| Ângulos da forma de onda observados | | | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
| 38,7 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\leq 60^\circ$ | SIM |
| 41,22 | | | I_{p+} e I_{p-} ocorrem $\leq 65^\circ$ | SIM |
| 108,18 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\geq 90^\circ$ | SIM |

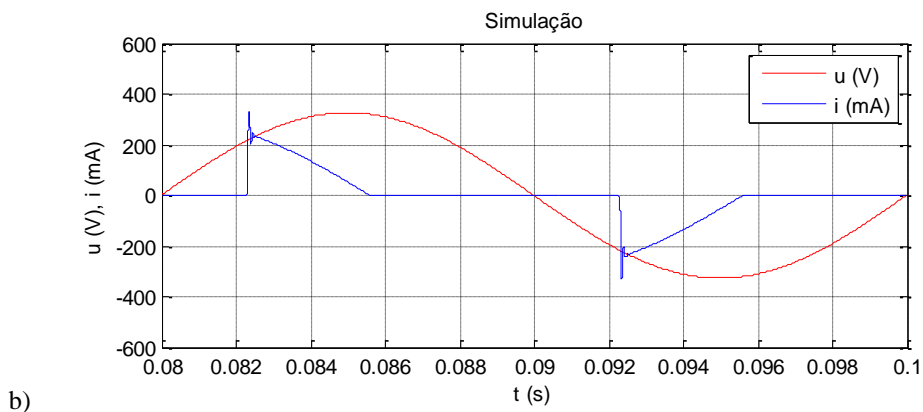
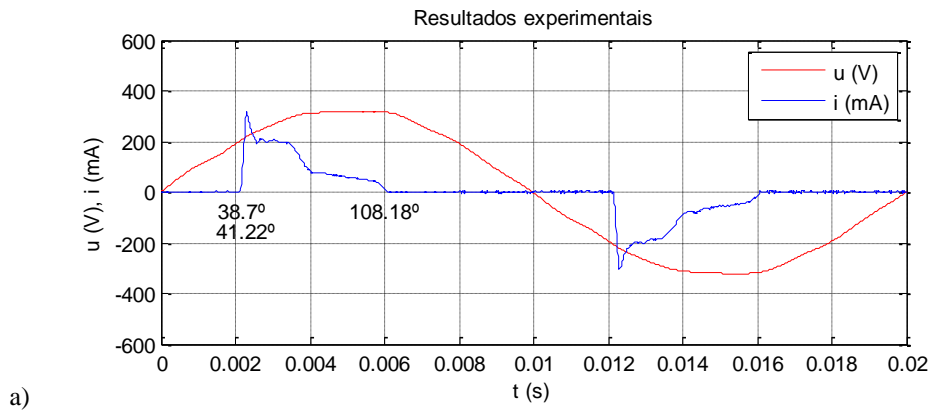


Figura 5.8 – Lâmpada 3: formas de onda de corrente e tensão observadas: a) resultados experimentais, b) simulação

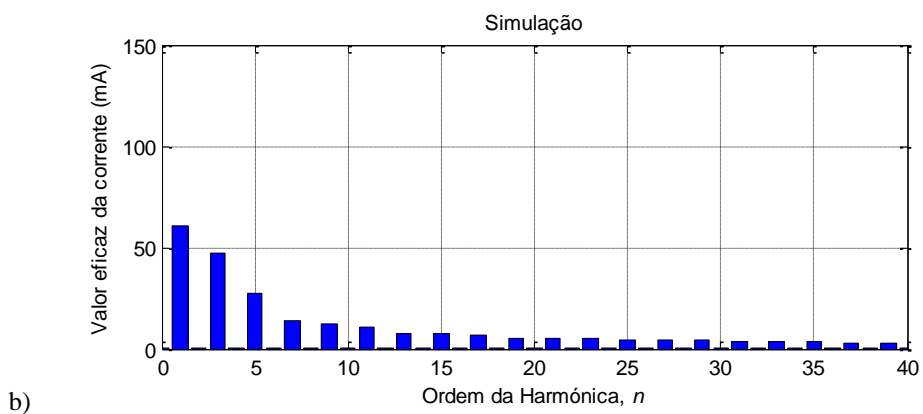
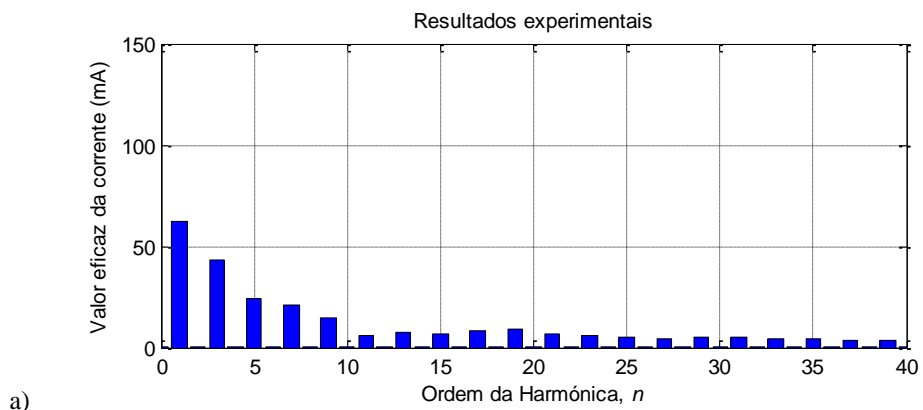


Figura 5.9 – Lâmpada 3: espectro harmônico da corrente: a) resultados experimentais, b) simulação

5.2.4. Lâmpada 4: Dulux Superstar Classic A 5W E27

Tabela 5.11 – Lâmpada 4: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

I = 42,48 mA

| Ordem da harmónica, n | Valores medidos nos ensaios experimentais | | | Norma IEC 61000-3-2 | |
|-------------------------|---|-----------------------|------------------|---|-------------------------------|
| | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) | Corrente I_{nh} máxima para $P = 5W$ (mA) | Cumpre a corrente máxima? S/N |
| 1 | 32,13 | 100,00 | 75,64 | - | - |
| 3 | 20,42 | 63,56 | 48,08 | 17,00 | NÃO |
| 5 | 10,72 | 33,36 | 25,23 | 9,50 | NÃO |
| 7 | 9,68 | 30,12 | 22,78 | 5,00 | NÃO |
| 9 | 5,60 | 17,44 | 13,19 | 2,50 | NÃO |
| 11 | 2,82 | 8,77 | 6,64 | 1,75 | NÃO |
| 13 | 3,77 | 11,73 | 8,87 | 1,48 | NÃO |
| 15 | 3,22 | 10,01 | 7,58 | 1,28 | NÃO |
| 17 | 3,95 | 12,29 | 9,30 | 1,13 | NÃO |
| 19 | 3,61 | 11,24 | 8,50 | 1,01 | NÃO |
| 21 | 2,70 | 8,41 | 6,36 | 0,92 | NÃO |
| 23 | 2,42 | 7,54 | 5,71 | 0,84 | NÃO |
| 25 | 1,73 | 5,37 | 4,06 | 0,77 | NÃO |
| 27 | 2,18 | 6,78 | 5,13 | 0,71 | NÃO |
| 29 | 2,16 | 6,72 | 5,08 | 0,66 | NÃO |
| 31 | 1,67 | 5,20 | 3,94 | 0,62 | NÃO |
| 33 | 1,77 | 5,52 | 4,18 | 0,58 | NÃO |
| 35 | 1,52 | 4,71 | 3,57 | 0,55 | NÃO |
| 37 | 1,43 | 4,46 | 3,38 | 0,52 | NÃO |
| 39 | 1,31 | 4,06 | 3,07 | 0,49 | NÃO |

Tabela 5.12 – Lâmpada 4: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

| Ordem da harmónica, n | I_{nh} (mA) | Porcentagem de I_{1h} | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
|-------------------------------------|---------------|-------------------------|---|-------------|
| 1 | 32,13 | - | - | - |
| 3 | 20,42 | 63,56% | $I_{3h} \leq 86\%$ de I_{1h} | SIM |
| 5 | 10,72 | 33,36% | $I_{5h} \leq 61\%$ de I_{1h} | SIM |
| Ângulos da forma de onda observados | | | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
| 17,28 | | | +0,05 $I_{p(ABS)}$ e -0,05 $I_{p(ABS)}$ ocorrem $\leq 60^\circ$ | SIM |
| 39,6 | | | I_{p+} e I_{p-} ocorrem $\leq 65^\circ$ | SIM |
| 108 | | | +0,05 $I_{p(ABS)}$ e -0,05 $I_{p(ABS)}$ ocorrem $\geq 90^\circ$ | SIM |

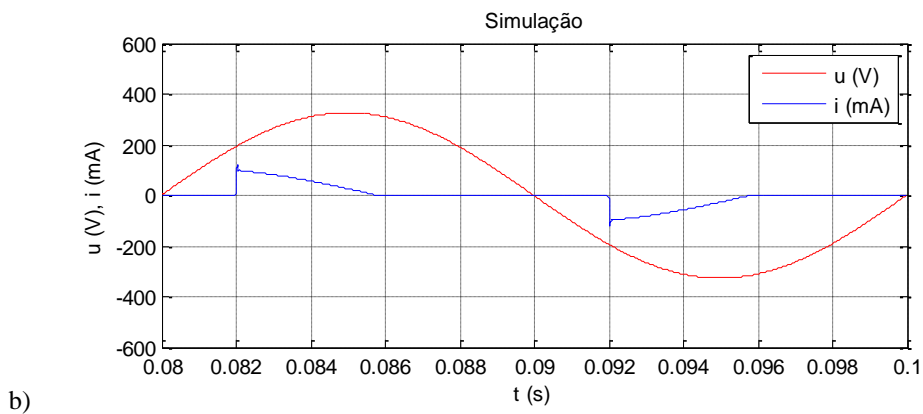
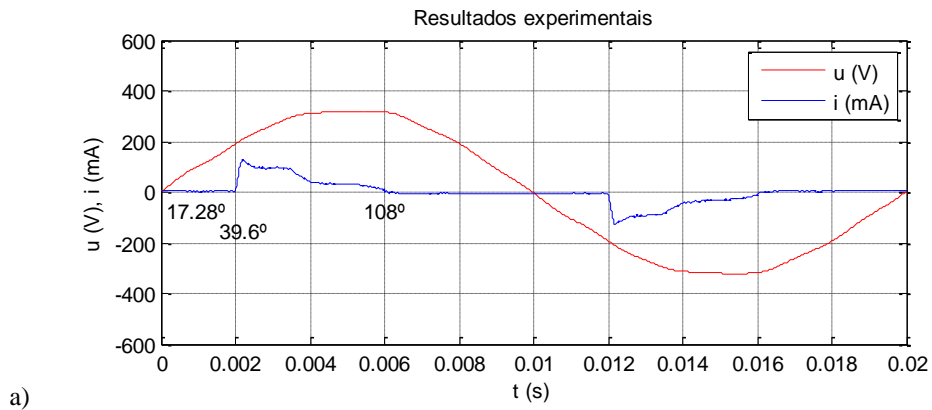


Figura 5.10 – Lâmpada 4: formas de onda de corrente e tensão observadas: a) resultados experimentais, b) simulação

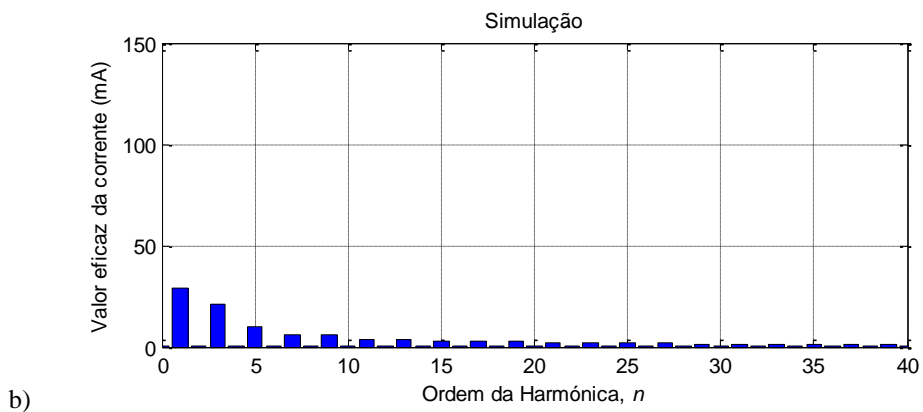
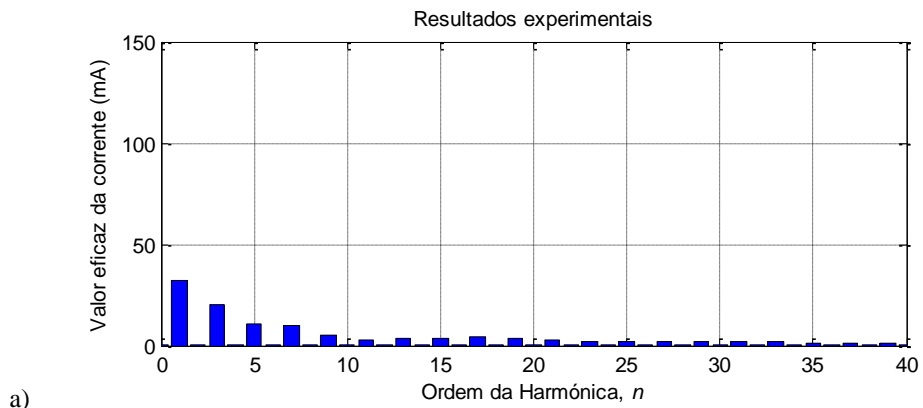


Figura 5.11 – Lâmpada 4: espectro harmônico da corrente: a) resultados experimentais, b) simulação

5.2.5. Lâmpada 5: Dulux EL Longlife 20W E27

Tabela 5.13 – Lâmpada 5: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

I = 132,43 mA

| Ordem da harmónica, <i>n</i> | Valores medidos nos ensaios experimentais | | | Norma IEC 61000-3-2 | |
|------------------------------|---|-----------------------|------------------|--|-------------------------------|
| | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) | Corrente I_{nh} máxima para $P = 20W$ (mA) | Cumpre a corrente máxima? S/N |
| 1 | 93,63 | 100,00 | 70,70 | - | - |
| 3 | 68,36 | 73,01 | 51,62 | 68,00 | NÃO |
| 5 | 39,99 | 42,71 | 30,20 | 38,00 | NÃO |
| 7 | 31,91 | 34,08 | 24,09 | 20,00 | NÃO |
| 9 | 26,42 | 28,22 | 19,95 | 10,00 | NÃO |
| 11 | 14,46 | 15,44 | 10,92 | 7,00 | NÃO |
| 13 | 9,63 | 10,28 | 7,27 | 5,92 | NÃO |
| 15 | 8,50 | 9,08 | 6,42 | 5,13 | NÃO |
| 17 | 5,84 | 6,24 | 4,41 | 4,53 | NÃO |
| 19 | 8,32 | 8,89 | 6,28 | 4,05 | NÃO |
| 21 | 7,82 | 8,35 | 5,90 | 3,67 | NÃO |
| 23 | 5,92 | 6,33 | 4,47 | 3,35 | NÃO |
| 25 | 6,06 | 6,47 | 4,58 | 3,08 | NÃO |
| 27 | 4,58 | 4,90 | 3,46 | 2,85 | NÃO |
| 29 | 3,85 | 4,11 | 2,91 | 2,66 | NÃO |
| 31 | 4,63 | 4,95 | 3,50 | 2,48 | NÃO |
| 33 | 3,62 | 3,87 | 2,73 | 2,33 | NÃO |
| 35 | 3,28 | 3,51 | 2,48 | 2,20 | NÃO |
| 37 | 3,37 | 3,59 | 2,54 | 2,08 | NÃO |
| 39 | 2,62 | 2,79 | 1,98 | 1,97 | NÃO |

Tabela 5.14 – Lâmpada 5: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

| Ordem da harmónica, <i>n</i> | I_{nh} (mA) | Porcentagem de I_{1h} | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
|-------------------------------------|---------------|-------------------------|---|-------------|
| 1 | 93,63 | - | - | - |
| 3 | 68,36 | 73,01% | $I_{3h} \leq 86\%$ de I_{1h} | SIM |
| 5 | 39,99 | 42,71% | $I_{5h} \leq 61\%$ de I_{1h} | SIM |
| Ângulos da forma de onda observados | | | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
| 41,94 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\leq 60^\circ$ | SIM |
| 51,84 | | | I_{p+} e I_{p-} ocorrem $\leq 65^\circ$ | SIM |
| 107,46 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\geq 90^\circ$ | SIM |

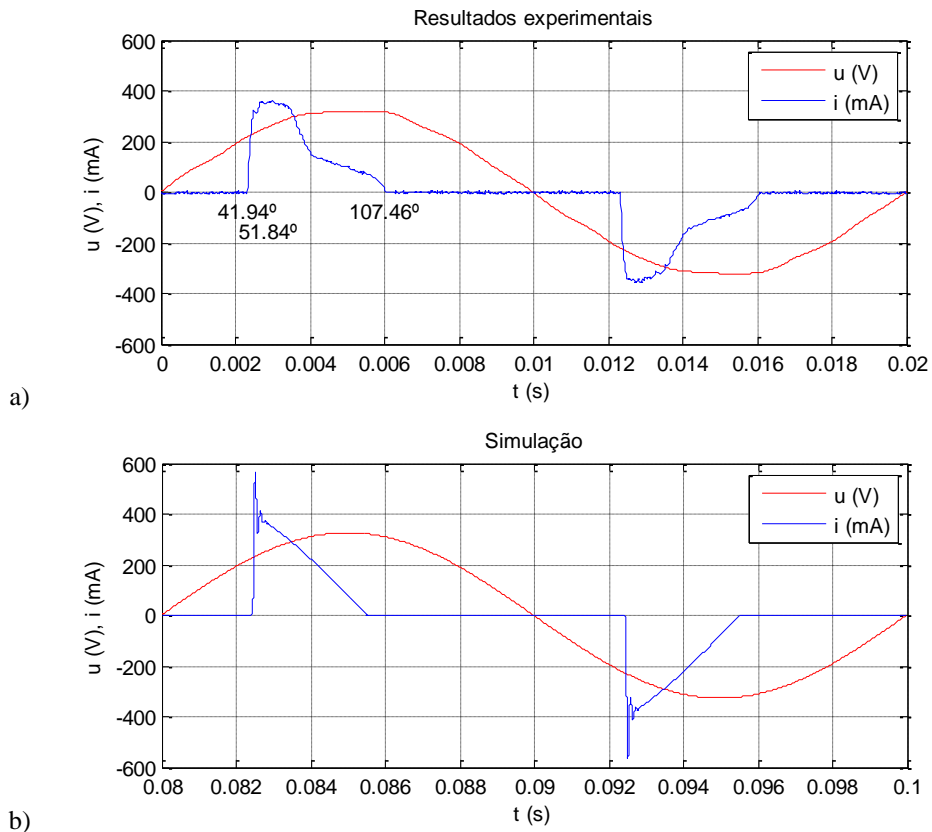


Figura 5.12 – Lâmpada 5: formas de onda de corrente e tensão observadas: a) resultados experimentais, b) simulação

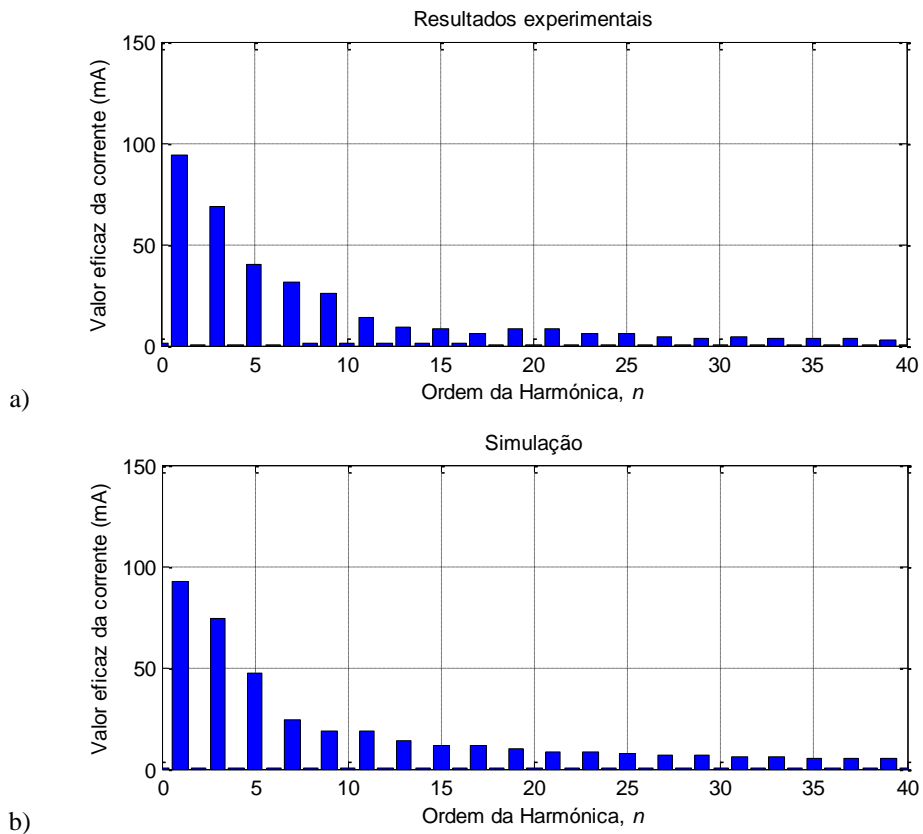


Figura 5.13 – Lâmpada 5: espectro harmônico da corrente: a) resultados experimentais, b) simulação

5.2.6. Lâmpada 6: Duluxstar 8W E14

Tabela 5.15 – Lâmpada 6: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

I = 57,21 mA

| Ordem da harmónica, <i>n</i> | Valores medidos nos ensaios experimentais | | | Norma IEC 61000-3-2 | |
|------------------------------|---|-----------------------|------------------|---|-------------------------------|
| | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) | Corrente I_{nh} máxima para $P = 8W$ (mA) | Cumpre a corrente máxima? S/N |
| 1 | 38,62 | 100,00 | 67,51 | - | - |
| 3 | 28,67 | 74,24 | 50,12 | 27,20 | NÃO |
| 5 | 17,65 | 45,71 | 30,85 | 15,20 | NÃO |
| 7 | 14,21 | 36,79 | 24,84 | 8,00 | NÃO |
| 9 | 13,20 | 34,17 | 23,07 | 4,00 | NÃO |
| 11 | 9,23 | 23,89 | 16,13 | 2,80 | NÃO |
| 13 | 6,38 | 16,51 | 11,15 | 2,37 | NÃO |
| 15 | 5,42 | 14,04 | 9,48 | 2,05 | NÃO |
| 17 | 3,56 | 9,22 | 6,22 | 1,81 | NÃO |
| 19 | 2,49 | 6,45 | 4,35 | 1,62 | NÃO |
| 21 | 3,23 | 8,36 | 5,64 | 1,47 | NÃO |
| 23 | 3,00 | 7,77 | 5,24 | 1,34 | NÃO |
| 25 | 2,75 | 7,11 | 4,80 | 1,23 | NÃO |
| 27 | 3,03 | 7,85 | 5,30 | 1,14 | NÃO |
| 29 | 2,52 | 6,53 | 4,41 | 1,06 | NÃO |
| 31 | 2,02 | 5,22 | 3,52 | 0,99 | NÃO |
| 33 | 2,13 | 5,51 | 3,72 | 0,93 | NÃO |
| 35 | 1,92 | 4,97 | 3,36 | 0,88 | NÃO |
| 37 | 1,61 | 4,17 | 2,82 | 0,83 | NÃO |
| 39 | 1,74 | 4,50 | 3,04 | 0,79 | NÃO |

Tabela 5.16 – Lâmpada 6: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

| Ordem da harmónica, <i>n</i> | I_{nh} (mA) | Porcentagem de I_{1h} | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
|-------------------------------------|---------------|-------------------------|---|-------------|
| 1 | 38,62 | - | - | - |
| 3 | 28,67 | 74,24% | $I_{3h} \leq 86\%$ de I_{1h} | SIM |
| 5 | 17,65 | 45,71% | $I_{5h} \leq 61\%$ de I_{1h} | SIM |
| Ângulos da forma de onda observados | | | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
| 45,9 | | | +0,05 $I_{p(abs)}$ e -0,05 $I_{p(abs)}$ ocorrem $\leq 60^\circ$ | SIM |
| 53,64 | | | I_{p+} e I_{p-} ocorrem $\leq 65^\circ$ | SIM |
| 107,28 | | | +0,05 $I_{p(abs)}$ e -0,05 $I_{p(abs)}$ ocorrem $\geq 90^\circ$ | SIM |

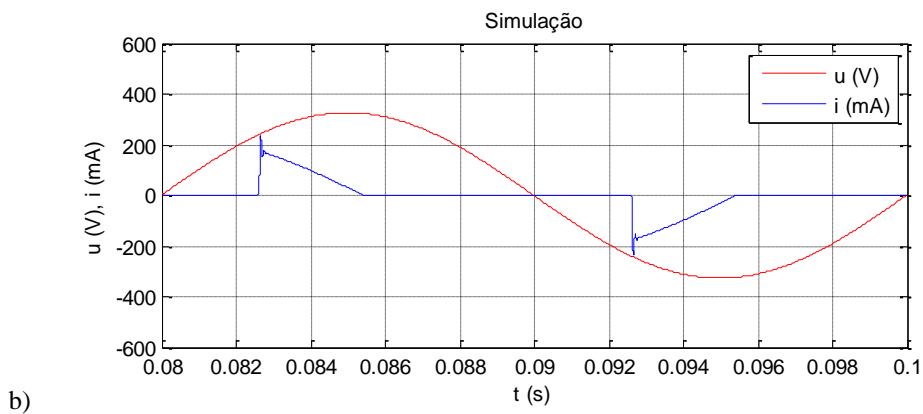
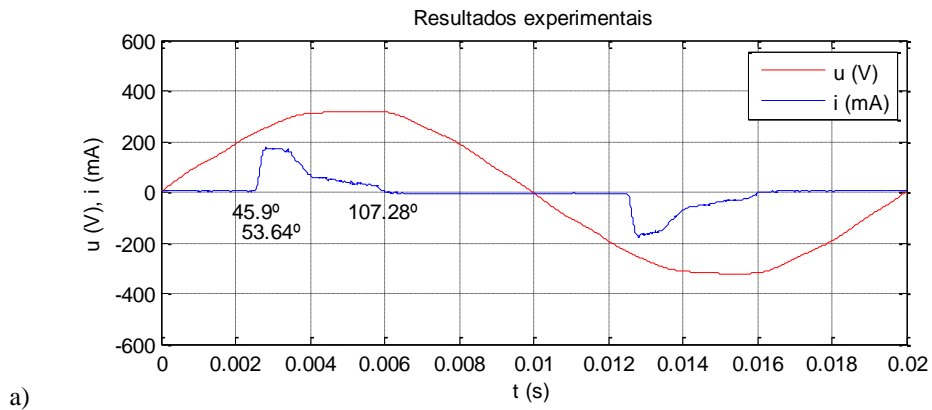


Figura 5.14 – Lâmpada 6: formas de onda de corrente e tensão observadas: a) resultados experimentais, b) simulação

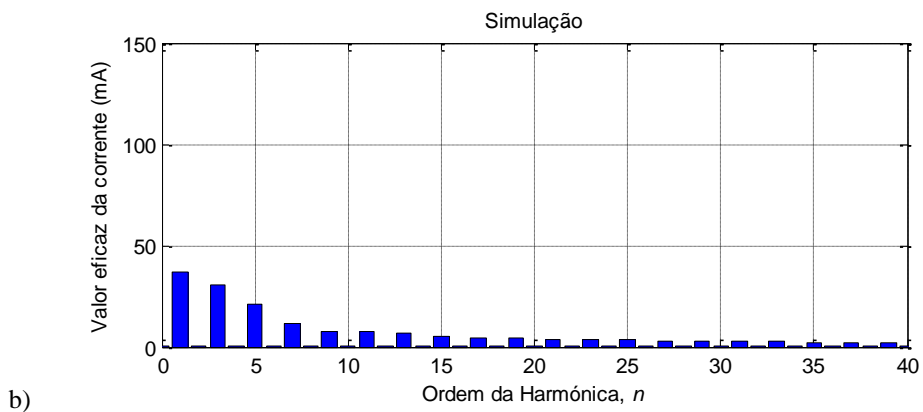
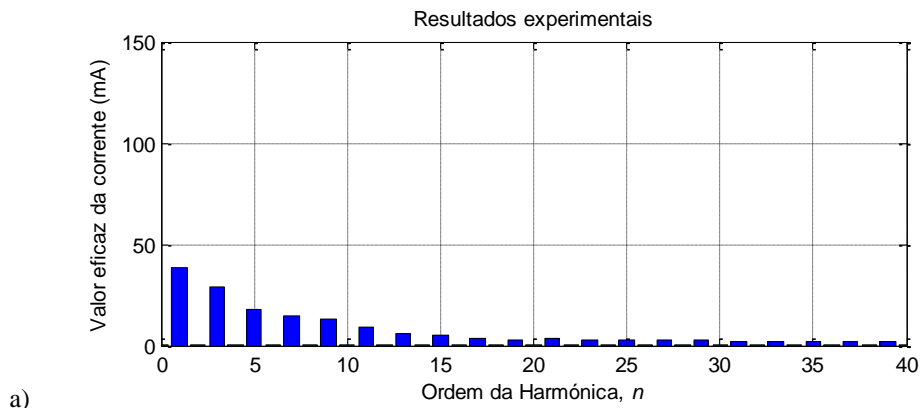


Figura 5.15 – Lâmpada 6: espectro harmônico da corrente: a) resultados experimentais, b) simulação

5.2.7. Lâmpada 7: Duluxstar Mini Bullet T 7W E27

Tabela 5.17 – Lâmpada 7: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

I = 42,73 mA

| Ordem da harmónica, <i>n</i> | Valores medidos nos ensaios experimentais | | | Norma IEC 61000-3-2 | |
|------------------------------|---|-----------------------|------------------|---|-------------------------------|
| | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) | Corrente I_{nh} máxima para $P = 7W$ (mA) | Cumpre a corrente máxima? S/N |
| 1 | 28,39 | 100,00 | 66,44 | - | - |
| 3 | 22,51 | 79,29 | 52,68 | 23,80 | SIM |
| 5 | 14,42 | 50,78 | 33,74 | 13,30 | NÃO |
| 7 | 10,70 | 37,69 | 25,04 | 7,00 | NÃO |
| 9 | 9,64 | 33,94 | 22,55 | 3,50 | NÃO |
| 11 | 6,86 | 24,17 | 16,06 | 2,45 | NÃO |
| 13 | 4,09 | 14,42 | 9,58 | 2,07 | NÃO |
| 15 | 3,56 | 12,53 | 8,33 | 1,80 | NÃO |
| 17 | 2,74 | 9,66 | 6,42 | 1,59 | NÃO |
| 19 | 1,93 | 6,81 | 4,52 | 1,42 | NÃO |
| 21 | 2,57 | 9,05 | 6,01 | 1,28 | NÃO |
| 23 | 2,53 | 8,89 | 5,91 | 1,17 | NÃO |
| 25 | 1,99 | 7,00 | 4,65 | 1,08 | NÃO |
| 27 | 2,02 | 7,10 | 4,72 | 1,00 | NÃO |
| 29 | 1,82 | 6,42 | 4,27 | 0,93 | NÃO |
| 31 | 1,29 | 4,56 | 3,03 | 0,87 | NÃO |
| 33 | 1,31 | 4,62 | 3,07 | 0,82 | NÃO |
| 35 | 1,28 | 4,49 | 2,98 | 0,77 | NÃO |
| 37 | 0,97 | 3,40 | 2,26 | 0,73 | NÃO |
| 39 | 0,95 | 3,36 | 2,23 | 0,69 | NÃO |

Tabela 5.18 – Lâmpada 7: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

| Ordem da harmónica, <i>n</i> | I_{nh} (mA) | Percentagem de I_{1h} | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
|-------------------------------------|---------------|-------------------------|---|-------------|
| 1 | 28,39 | - | - | - |
| 3 | 22,51 | 79,29% | $I_{3h} \leq 86\%$ de I_{1h} | SIM |
| 5 | 14,42 | 50,78% | $I_{5h} \leq 61\%$ de I_{1h} | SIM |
| Ângulos da forma de onda observados | | | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
| 46,8 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\leq 60^\circ$ | SIM |
| 53,28 | | | I_{p+} e I_{p-} ocorrem $\leq 65^\circ$ | SIM |
| 106,2 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\geq 90^\circ$ | SIM |

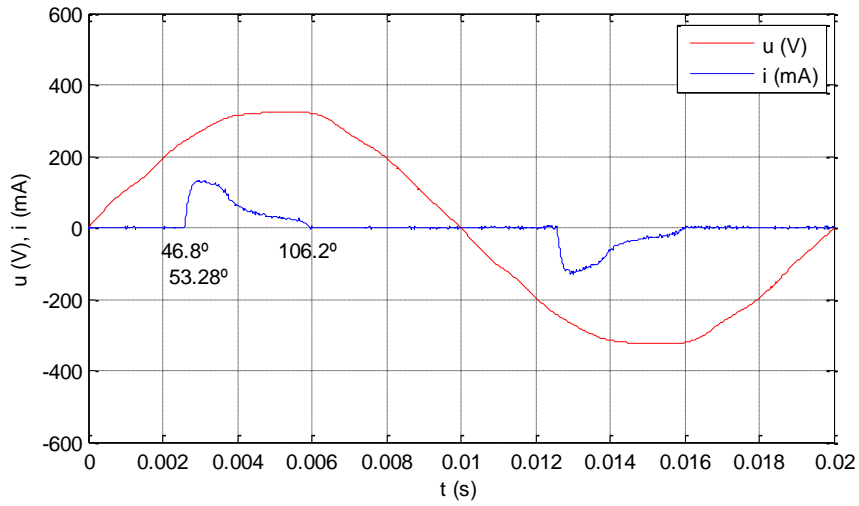


Figura 5.16 – Lâmpada 7: formas de onda de corrente e tensão observadas experimentalmente

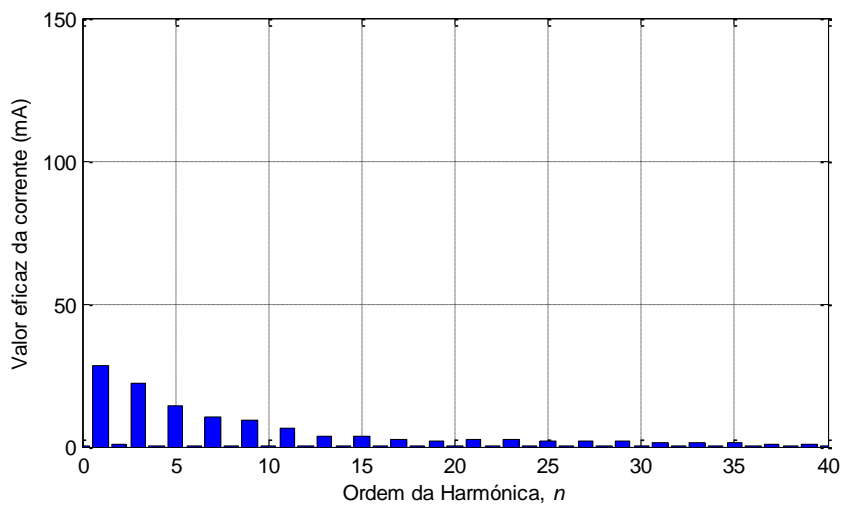


Figura 5.17 – Lâmpada 7: espectro harmônico da corrente obtido experimentalmente

5.2.8. Lâmpada 8: Dulux EL Economy 8W E27

Tabela 5.19 – Lâmpada 8: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

I = 61,62 mA

| Ordem da harmónica, <i>n</i> | Valores medidos nos ensaios experimentais | | | Norma IEC 61000-3-2 | |
|------------------------------|---|-----------------------|------------------|---|-------------------------------|
| | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) | Corrente I_{nh} máxima para $P = 8W$ (mA) | Cumpre a corrente máxima? S/N |
| 1 | 31,86 | 100,00 | 51,70 | - | - |
| 3 | 27,60 | 86,62 | 44,78 | 27,20 | NÃO |
| 5 | 20,93 | 65,69 | 33,96 | 15,20 | NÃO |
| 7 | 15,24 | 47,83 | 24,73 | 8,00 | NÃO |
| 9 | 13,44 | 42,19 | 21,81 | 4,00 | NÃO |
| 11 | 13,80 | 43,33 | 22,40 | 2,80 | NÃO |
| 13 | 13,26 | 41,62 | 21,52 | 2,37 | NÃO |
| 15 | 11,55 | 36,24 | 18,74 | 2,05 | NÃO |
| 17 | 10,07 | 31,62 | 16,35 | 1,81 | NÃO |
| 19 | 9,62 | 30,21 | 15,62 | 1,62 | NÃO |
| 21 | 9,35 | 29,34 | 15,17 | 1,47 | NÃO |
| 23 | 8,50 | 26,66 | 13,79 | 1,34 | NÃO |
| 25 | 7,38 | 23,16 | 11,97 | 1,23 | NÃO |
| 27 | 6,63 | 20,81 | 10,76 | 1,14 | NÃO |
| 29 | 6,17 | 19,37 | 10,02 | 1,06 | NÃO |
| 31 | 5,49 | 17,24 | 8,91 | 0,99 | NÃO |
| 33 | 4,56 | 14,31 | 7,40 | 0,93 | NÃO |
| 35 | 3,86 | 12,10 | 6,26 | 0,88 | NÃO |
| 37 | 3,61 | 11,32 | 5,85 | 0,83 | NÃO |
| 39 | 3,42 | 10,74 | 5,55 | 0,79 | NÃO |

Tabela 5.20 – Lâmpada 8: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

| Ordem da harmónica, <i>n</i> | I_{nh} (mA) | Percentagem de I_{1h} | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
|-------------------------------------|---------------|-------------------------|---|-------------|
| 1 | 31,86 | - | - | - |
| 3 | 27,60 | 86,62% | $I_{3h} \leq 86\%$ de I_{1h} | NÃO |
| 5 | 20,93 | 65,69% | $I_{5h} \leq 61\%$ de I_{1h} | NÃO |
| Ângulos da forma de onda observados | | | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
| 60,66 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\leq 60^\circ$ | NÃO |
| 64,08 | | | I_{p+} e I_{p-} ocorrem $\leq 65^\circ$ | SIM |
| 103,68 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\geq 90^\circ$ | SIM |

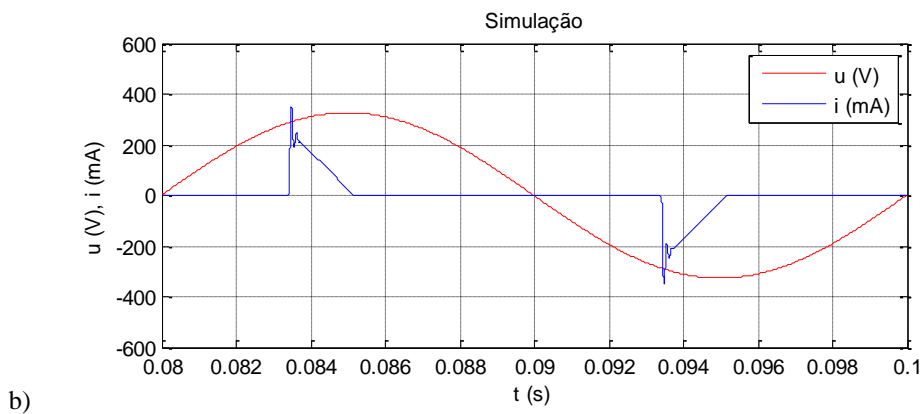
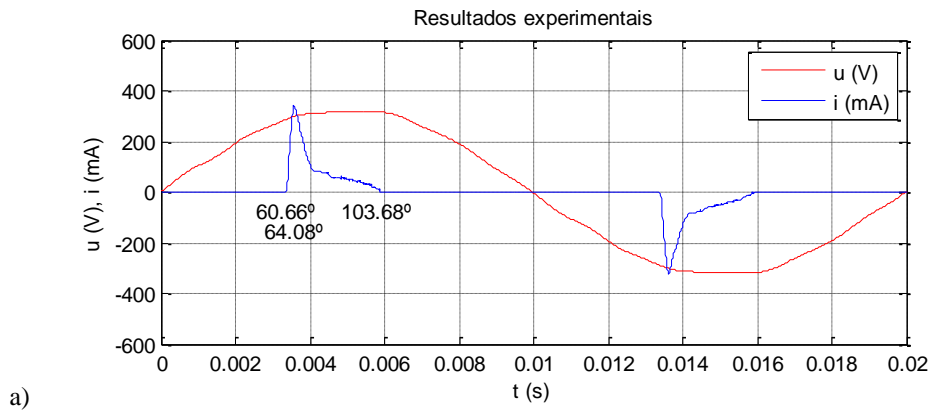


Figura 5.18 – Lâmpada 8: formas de onda de corrente e tensão observadas: a) resultados experimentais, b) simulação

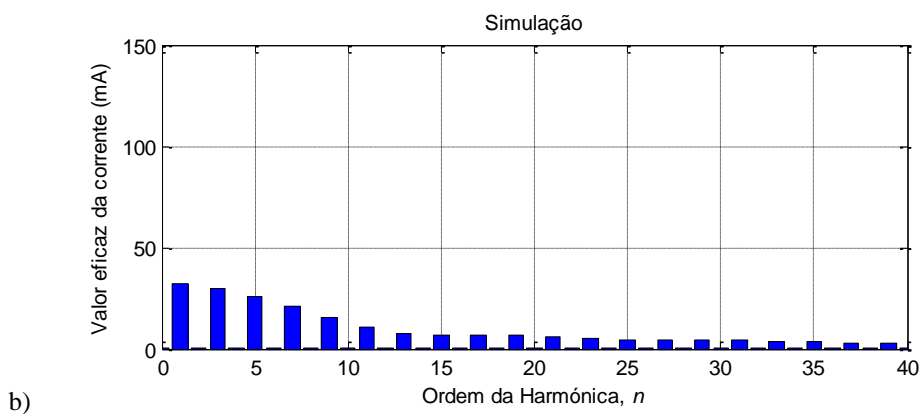
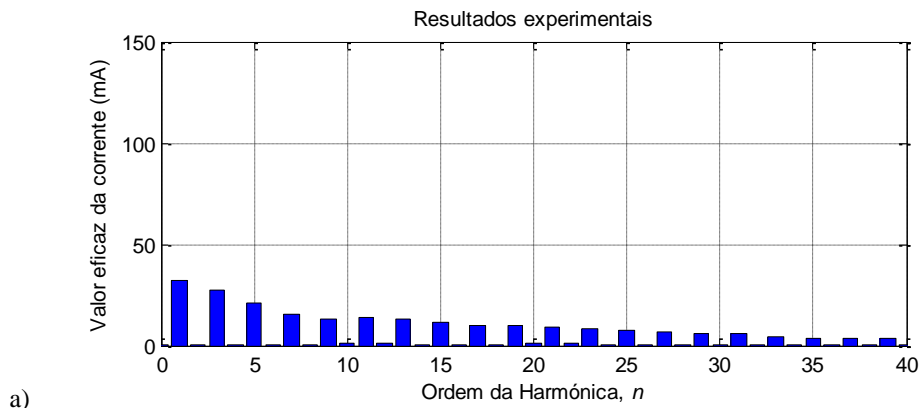


Figura 5.19 – Lâmpada 8: espectro harmônico da corrente: a) resultados experimentais, b) simulação

5.2.9. Lâmpada 9: Parathom PAR16 5W GU10

Tabela 5.21 – Lâmpada 9: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

I = 33,59 mA

| Ordem da harmónica, <i>n</i> | Valores medidos nos ensaios experimentais | | | Norma IEC 61000-3-2 | |
|------------------------------|---|-----------------------|------------------|---|-------------------------------|
| | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) | Corrente I_{nh} máxima para $P = 5W$ (mA) | Cumpre a corrente máxima? S/N |
| 1 | 17,29 | 100,00 | 51,47 | - | - |
| 3 | 16,02 | 92,64 | 47,68 | 17,00 | SIM |
| 5 | 13,74 | 79,48 | 40,91 | 9,50 | NÃO |
| 7 | 10,98 | 63,48 | 32,67 | 5,00 | NÃO |
| 9 | 8,37 | 48,39 | 24,91 | 2,50 | NÃO |
| 11 | 6,52 | 37,68 | 19,40 | 1,75 | NÃO |
| 13 | 5,60 | 32,36 | 16,66 | 1,48 | NÃO |
| 15 | 5,14 | 29,73 | 15,30 | 1,28 | NÃO |
| 17 | 4,60 | 26,62 | 13,70 | 1,13 | NÃO |
| 19 | 3,82 | 22,08 | 11,37 | 1,01 | NÃO |
| 21 | 2,94 | 17,02 | 8,76 | 0,92 | NÃO |
| 23 | 2,27 | 13,10 | 6,74 | 0,84 | NÃO |
| 25 | 1,93 | 11,17 | 5,75 | 0,77 | NÃO |
| 27 | 1,77 | 10,24 | 5,27 | 0,71 | NÃO |
| 29 | 1,55 | 8,94 | 4,60 | 0,66 | NÃO |
| 31 | 1,21 | 6,97 | 3,59 | 0,62 | NÃO |
| 33 | 0,86 | 4,95 | 2,55 | 0,58 | NÃO |
| 35 | 0,65 | 3,75 | 1,93 | 0,55 | NÃO |
| 37 | 0,60 | 3,49 | 1,80 | 0,52 | NÃO |
| 39 | 0,57 | 3,29 | 1,69 | 0,49 | NÃO |

Tabela 5.22 – Lâmpada 9: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

| Ordem da harmónica, <i>n</i> | I_{nh} (mA) | Percentagem de I_{1h} | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
|-------------------------------------|---------------|-------------------------|---|-------------|
| 1 | 17,29 | - | - | - |
| 3 | 16,02 | 92,64% | $I_{3h} \leq 86\%$ de I_{1h} | NÃO |
| 5 | 13,74 | 79,48% | $I_{5h} \leq 61\%$ de I_{1h} | NÃO |
| Ângulos da forma de onda observados | | | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
| 69,3 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\leq 60^\circ$ | NÃO |
| 77,04 | | | I_{p+} e I_{p-} ocorrem $\leq 65^\circ$ | NÃO |
| 102,6 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\geq 90^\circ$ | SIM |

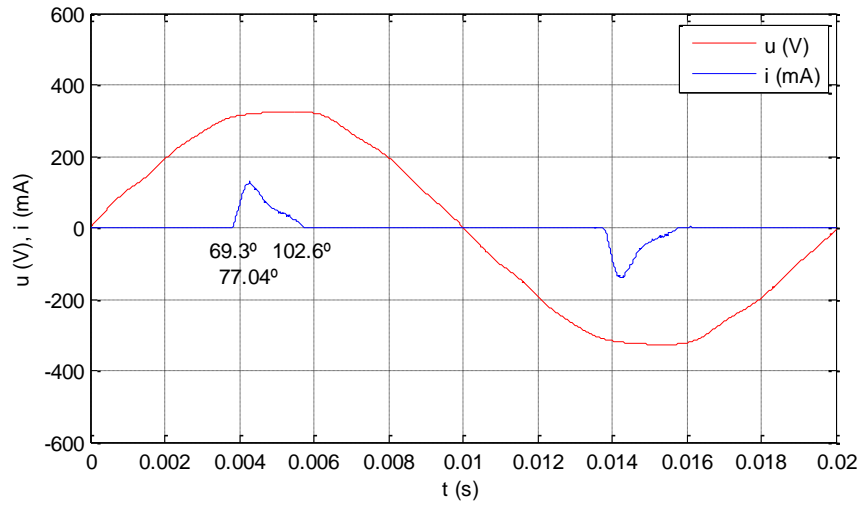


Figura 5.20 – Lâmpada 9: formas de onda de corrente e tensão observadas experimentalmente

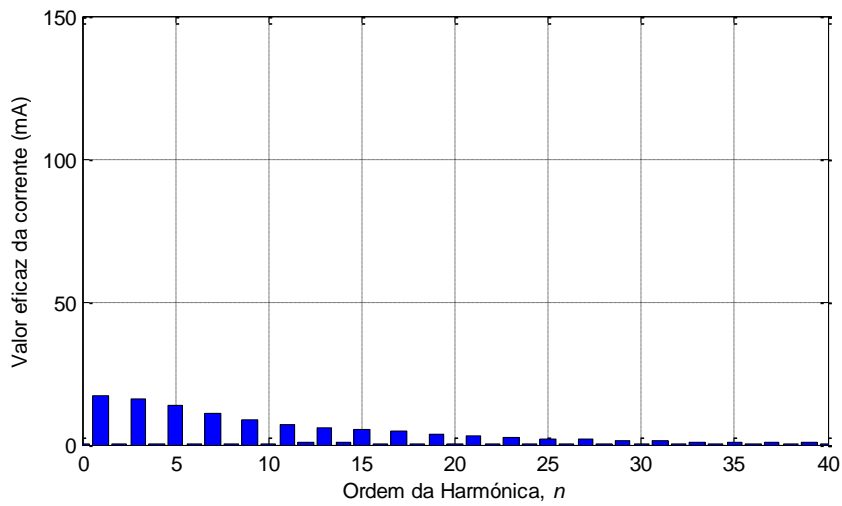


Figura 5.21 – Lâmpada 9: espectro harmônico da corrente obtido experimentalmente

5.2.10. Lâmpada 10: Parathom Pro PAR16 Advanced 10W GU10

Tabela 5.23 – Lâmpada 10: valores medidos e verificação do primeiro conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

I = 41,98 mA

| Ordem da harmónica, <i>n</i> | Valores medidos nos ensaios experimentais | | | Norma IEC 61000-3-2 | |
|------------------------------|---|-----------------------|------------------|--|-------------------------------|
| | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) | Corrente I_{nh} máxima para $P = 10W$ (mA) | Cumpre a corrente máxima? S/N |
| 1 | 39,50 | 100,00 | 94,08 | - | - |
| 3 | 12,78 | 32,34 | 30,43 | 34,00 | SIM |
| 5 | 2,36 | 5,97 | 5,61 | 19,00 | SIM |
| 7 | 0,44 | 1,11 | 1,05 | 10,00 | SIM |
| 9 | 2,35 | 5,95 | 5,60 | 5,00 | SIM |
| 11 | 1,75 | 4,42 | 4,16 | 3,50 | SIM |
| 13 | 0,38 | 0,97 | 0,91 | 2,96 | SIM |
| 15 | 1,36 | 3,43 | 3,23 | 2,57 | SIM |
| 17 | 0,90 | 2,29 | 2,15 | 2,26 | SIM |
| 19 | 0,79 | 2,01 | 1,89 | 2,03 | SIM |
| 21 | 0,45 | 1,13 | 1,07 | 1,83 | SIM |
| 23 | 0,22 | 0,54 | 0,51 | 1,67 | SIM |
| 25 | 0,45 | 1,15 | 1,08 | 1,54 | SIM |
| 27 | 0,86 | 2,17 | 2,04 | 1,43 | SIM |
| 29 | 0,52 | 1,30 | 1,23 | 1,33 | SIM |
| 31 | 0,42 | 1,07 | 1,01 | 1,24 | SIM |
| 33 | 0,16 | 0,39 | 0,37 | 1,17 | SIM |
| 35 | 0,08 | 0,20 | 0,19 | 1,10 | SIM |
| 37 | 0,23 | 0,59 | 0,55 | 1,04 | SIM |
| 39 | 0,40 | 1,01 | 0,95 | 0,99 | SIM |

Tabela 5.24 – Lâmpada 10: verificação do segundo conjunto de requisitos dado pela norma IEC 61000-3-2

| Ordem da harmónica, <i>n</i> | I_{nh} (mA) | Porcentagem de I_{1h} | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
|-------------------------------------|---------------|-------------------------|---|-------------|
| 1 | 39,50 | - | - | - |
| 3 | 12,78 | 32,34% | $I_{3h} \leq 86\%$ de I_{1h} | SIM |
| 5 | 2,36 | 5,97% | $I_{5h} \leq 61\%$ de I_{1h} | SIM |
| Ângulos da forma de onda observados | | | Regras a cumprir | Cumpre? S/N |
| 3,24 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\leq 60^\circ$ | SIM |
| 67,14 | | | I_{p+} e I_{p-} ocorrem $\leq 65^\circ$ | NÃO |
| 150,12 | | | $+0,05I_{p(ABS)}$ e $-0,05I_{p(ABS)}$ ocorrem $\geq 90^\circ$ | SIM |

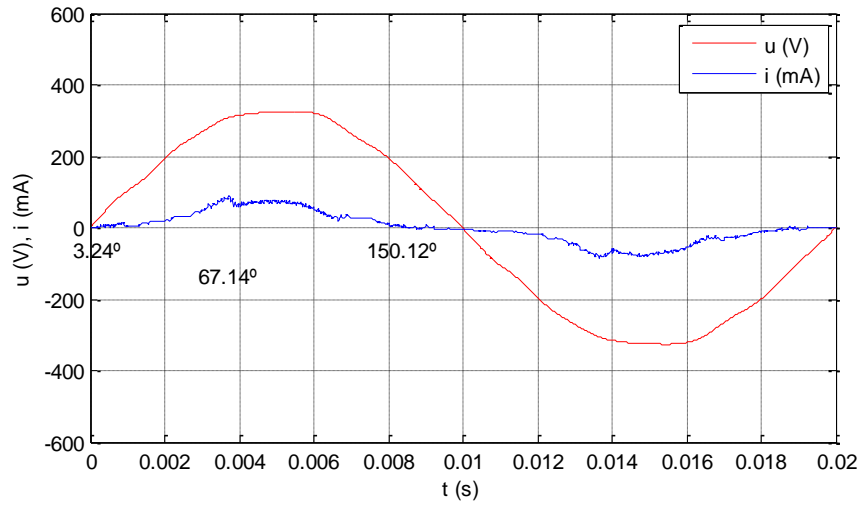


Figura 5.22 – Lâmpada 10: formas de onda de corrente e tensão observadas experimentalmente

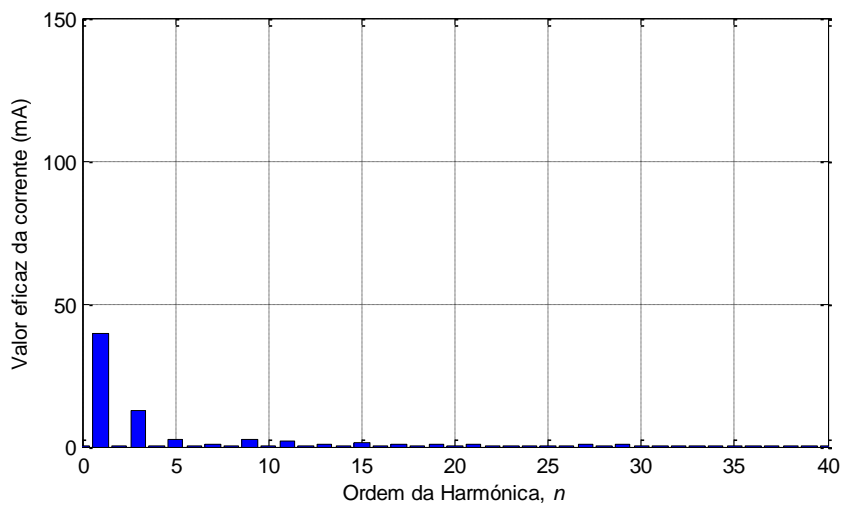


Figura 5.23 – Lâmpada 10: espectro harmônico da corrente obtido experimentalmente

5.2.11. Ensaio das lâmpadas 3 e 9 em paralelo numa única fase

Neste ensaio pretende-se avaliar o espectro harmónico da corrente total solicitada por duas lâmpadas ligadas em paralelo na mesma fase. Foi utilizada a lâmpada de referência 3, do tipo compacta fluorescente, e a lâmpada 9, de LED. Apesar de serem tecnologias de iluminação distintas, face aos resultados obtidos individualmente para cada uma destas lâmpadas em 5.2.3 e 5.2.9, o seu circuito eléctrico aparenta ser da mesma tipologia.

São indicados os valores eficazes das correntes obtidas, nomeadamente a corrente total I , a corrente da componente fundamental I_{1h} e as correntes harmónicas I_{nh} . É ilustrado também um período das formas de onda de tensão e de corrente, assim como um gráfico de barras do espectro harmónico da corrente observado.

Tabela 5.25 – Ensaio das lâmpadas 3 e 9 em paralelo: correntes obtidas experimentalmente

I = 102,52 mA

| Ordem da harmónica, n | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) |
|-------------------------|---------------|-----------------------|------------------|
| 1 | 77,57 | 100,00 | 75,66 |
| 2 | 0,73 | 0,94 | 0,71 |
| 3 | 53,92 | 69,52 | 52,60 |
| 4 | 0,14 | 0,18 | 0,14 |
| 5 | 21,42 | 27,61 | 20,89 |
| 6 | 0,54 | 0,70 | 0,53 |
| 7 | 8,41 | 10,84 | 8,20 |
| 8 | 1,02 | 1,32 | 1,00 |
| 9 | 11,80 | 15,22 | 11,51 |
| 10 | 1,18 | 1,52 | 1,15 |
| 11 | 13,17 | 16,98 | 12,85 |
| 12 | 0,95 | 1,22 | 0,92 |
| 13 | 13,93 | 17,95 | 13,58 |
| 14 | 0,41 | 0,53 | 0,40 |
| 15 | 8,14 | 10,49 | 7,94 |
| 16 | 0,14 | 0,18 | 0,13 |
| 17 | 1,83 | 2,35 | 1,78 |
| 18 | 0,29 | 0,38 | 0,28 |
| 19 | 7,59 | 9,78 | 7,40 |
| 20 | 0,46 | 0,59 | 0,45 |

| Ordem da harmónica, n | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) |
|-------------------------|---------------|-----------------------|------------------|
| 21 | 8,15 | 10,51 | 7,95 |
| 22 | 0,44 | 0,56 | 0,43 |
| 23 | 7,68 | 9,90 | 7,49 |
| 24 | 0,24 | 0,31 | 0,24 |
| 25 | 6,39 | 8,24 | 6,23 |
| 26 | 0,11 | 0,14 | 0,11 |
| 27 | 3,52 | 4,54 | 3,43 |
| 28 | 0,11 | 0,14 | 0,10 |
| 29 | 3,59 | 4,63 | 3,50 |
| 30 | 0,23 | 0,30 | 0,23 |
| 31 | 4,77 | 6,15 | 4,65 |
| 32 | 0,40 | 0,51 | 0,39 |
| 33 | 4,98 | 6,42 | 4,86 |
| 34 | 0,30 | 0,39 | 0,29 |
| 35 | 5,15 | 6,64 | 5,02 |
| 36 | 0,21 | 0,27 | 0,20 |
| 37 | 4,18 | 5,39 | 4,08 |
| 38 | 0,20 | 0,25 | 0,19 |
| 39 | 3,28 | 4,23 | 3,20 |
| 40 | 0,09 | 0,12 | 0,09 |

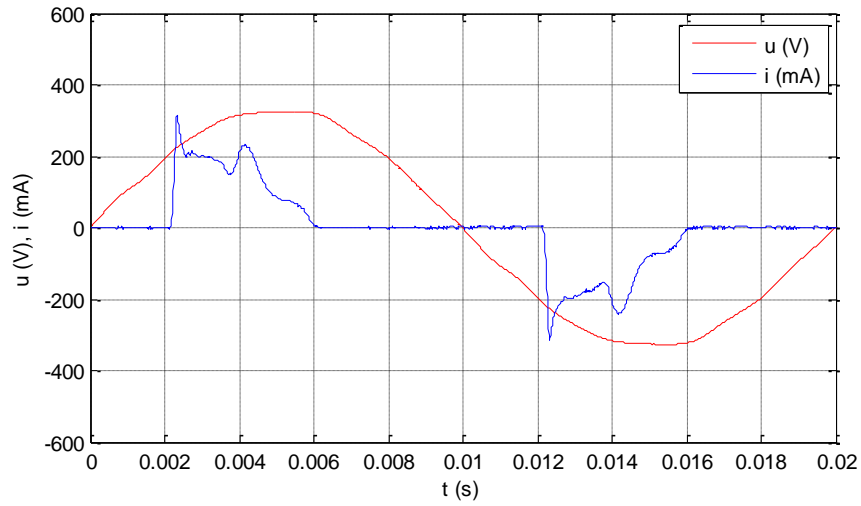


Figura 5.24 – Ensaio das lâmpadas 3 e 9 em paralelo: formas de onda de corrente e tensão observadas experimentalmente

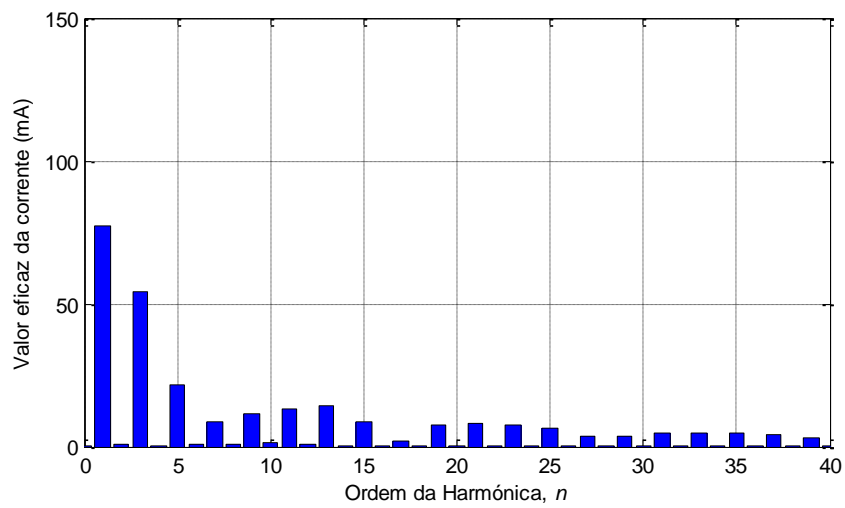


Figura 5.25 – Ensaio das lâmpadas 3 e 9 em paralelo: espectro harmônico da corrente obtido experimentalmente

5.2.12. Ensaio das lâmpadas 3 e 10 em paralelo numa única fase

Neste ensaio pretende-se avaliar o espectro harmónico da corrente total solicitada por duas lâmpadas ligadas em paralelo na mesma fase. Foi utilizada a lâmpada de referência 3, do tipo compacta fluorescente, e a lâmpada 10, de LED. Estas lâmpadas utilizam tecnologias de iluminação distintas e, tendo em conta os resultados obtidos individualmente para a lâmpada 10 em 5.2.10, esta lâmpada tem formas de onda e espectros harmónicos distintos das outras lâmpadas, pelo que deve possuir um circuito eléctrico de outro tipo.

São indicados os valores eficazes das correntes obtidas, nomeadamente a corrente total I , a corrente da componente fundamental I_{1h} e as correntes harmónicas I_{nh} . É ilustrado também um período das formas de onda de tensão e de corrente, assim como um gráfico de barras do espectro harmónico da corrente observado.

Tabela 5.26 – Ensaio das lâmpadas 3 e 10 em paralelo: correntes obtidas experimentalmente

I = 115,60 mA

| Ordem da harmónica, n | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) |
|-------------------------|---------------|-----------------------|------------------|
| 1 | 96,26 | 100,00 | 83,27 |
| 2 | 0,14 | 0,14 | 0,12 |
| 3 | 48,05 | 49,92 | 41,57 |
| 4 | 0,24 | 0,25 | 0,21 |
| 5 | 24,33 | 25,27 | 21,05 |
| 6 | 0,46 | 0,48 | 0,40 |
| 7 | 19,20 | 19,94 | 16,61 |
| 8 | 0,76 | 0,79 | 0,66 |
| 9 | 14,74 | 15,32 | 12,75 |
| 10 | 0,92 | 0,96 | 0,80 |
| 11 | 4,35 | 4,52 | 3,76 |
| 12 | 0,94 | 0,98 | 0,81 |
| 13 | 7,59 | 7,89 | 6,57 |
| 14 | 0,73 | 0,76 | 0,63 |
| 15 | 5,90 | 6,13 | 5,10 |
| 16 | 0,51 | 0,53 | 0,44 |
| 17 | 7,37 | 7,66 | 6,37 |
| 18 | 0,21 | 0,22 | 0,18 |
| 19 | 8,61 | 8,94 | 7,45 |
| 20 | 0,08 | 0,08 | 0,06 |

| Ordem da harmónica, n | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) |
|-------------------------|---------------|-----------------------|------------------|
| 21 | 6,72 | 6,98 | 5,82 |
| 22 | 0,16 | 0,17 | 0,14 |
| 23 | 5,19 | 5,40 | 4,49 |
| 24 | 0,28 | 0,30 | 0,25 |
| 25 | 4,41 | 4,58 | 3,82 |
| 26 | 0,32 | 0,34 | 0,28 |
| 27 | 4,63 | 4,81 | 4,00 |
| 28 | 0,41 | 0,43 | 0,35 |
| 29 | 4,79 | 4,97 | 4,14 |
| 30 | 0,23 | 0,24 | 0,20 |
| 31 | 5,23 | 5,43 | 4,52 |
| 32 | 0,08 | 0,08 | 0,07 |
| 33 | 3,99 | 4,14 | 3,45 |
| 34 | 0,12 | 0,12 | 0,10 |
| 35 | 3,79 | 3,94 | 3,28 |
| 36 | 0,13 | 0,14 | 0,11 |
| 37 | 3,50 | 3,64 | 3,03 |
| 38 | 0,15 | 0,15 | 0,13 |
| 39 | 3,57 | 3,70 | 3,08 |
| 40 | 0,15 | 0,15 | 0,13 |

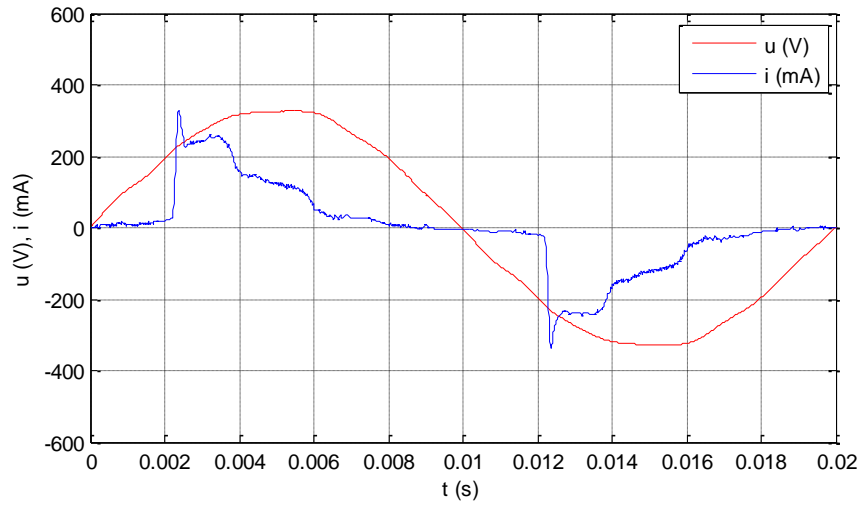


Figura 5.26 – Ensaio das lâmpadas 3 e 10 em paralelo: formas de onda de corrente e tensão observadas experimentalmente

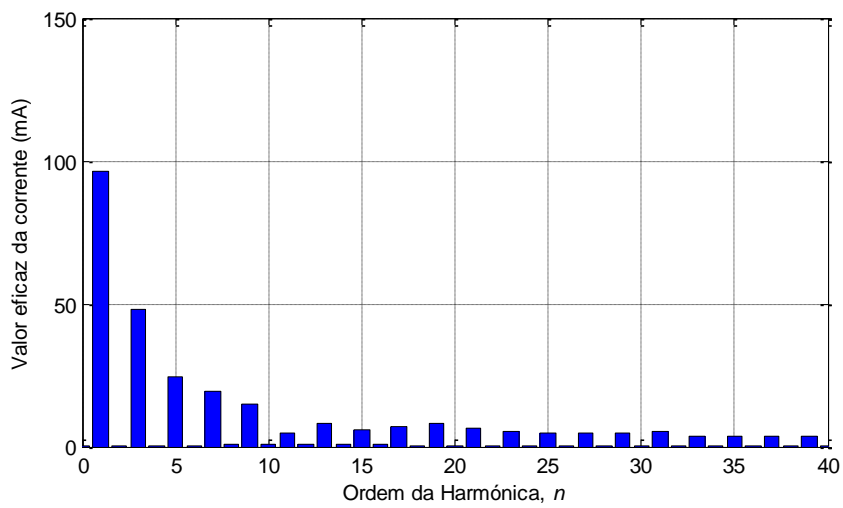


Figura 5.27 – Ensaio das lâmpadas 3 e 10 em paralelo: espectro harmônico da corrente obtido experimentalmente

5.2.13. Ensaio das lâmpadas 1, 3, 4, 5, 6 e 8 em paralelo numa única fase

Neste ensaio pretende-se avaliar o espectro harmónico da corrente total solicitada por seis lâmpadas compactas fluorescentes ligadas em paralelo na mesma fase. De seguida são indicados os valores eficazes das correntes obtidas, nomeadamente a corrente total I , a corrente da componente fundamental I_{1h} e as correntes harmónicas I_{nh} . É ilustrado também um período das formas de onda de tensão e de corrente, assim como um gráfico de barras do espectro harmónico da corrente observado.

Tabela 5.27 – Ensaio de 6 lâmpadas compactas fluorescentes em paralelo: correntes obtidas

I = 503,84 mA

| Ordem da harmónica, n | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) |
|-------------------------|---------------|-----------------------|------------------|
| 1 | 372,15 | 100,00 | 73,86 |
| 2 | 0,86 | 0,23 | 0,17 |
| 3 | 270,44 | 72,67 | 53,68 |
| 4 | 1,69 | 0,45 | 0,34 |
| 5 | 152,33 | 40,93 | 30,23 |
| 6 | 2,62 | 0,70 | 0,52 |
| 7 | 101,30 | 27,22 | 20,11 |
| 8 | 3,61 | 0,97 | 0,72 |
| 9 | 74,08 | 19,90 | 14,70 |
| 10 | 4,40 | 1,18 | 0,87 |
| 11 | 25,94 | 6,97 | 5,15 |
| 12 | 4,41 | 1,19 | 0,88 |
| 13 | 13,54 | 3,64 | 2,69 |
| 14 | 3,89 | 1,04 | 0,77 |
| 15 | 20,27 | 5,45 | 4,02 |
| 16 | 2,99 | 0,80 | 0,59 |
| 17 | 20,06 | 5,39 | 3,98 |
| 18 | 2,30 | 0,62 | 0,46 |
| 19 | 27,99 | 7,52 | 5,56 |
| 20 | 1,62 | 0,44 | 0,32 |

| Ordem da harmónica, n | I_{nh} (mA) | I_{nh} / I_{1h} (%) | I_{nh} / I (%) |
|-------------------------|---------------|-----------------------|------------------|
| 21 | 23,76 | 6,38 | 4,72 |
| 22 | 0,84 | 0,23 | 0,17 |
| 23 | 11,30 | 3,04 | 2,24 |
| 24 | 0,80 | 0,22 | 0,16 |
| 25 | 4,79 | 1,29 | 0,95 |
| 26 | 1,31 | 0,35 | 0,26 |
| 27 | 3,33 | 0,90 | 0,66 |
| 28 | 1,82 | 0,49 | 0,36 |
| 29 | 5,65 | 1,52 | 1,12 |
| 30 | 2,05 | 0,55 | 0,41 |
| 31 | 6,45 | 1,73 | 1,28 |
| 32 | 1,68 | 0,45 | 0,33 |
| 33 | 4,29 | 1,15 | 0,85 |
| 34 | 1,20 | 0,32 | 0,24 |
| 35 | 4,27 | 1,15 | 0,85 |
| 36 | 0,81 | 0,22 | 0,16 |
| 37 | 6,17 | 1,66 | 1,23 |
| 38 | 0,28 | 0,07 | 0,06 |
| 39 | 6,04 | 1,62 | 1,20 |
| 40 | 0,38 | 0,10 | 0,07 |

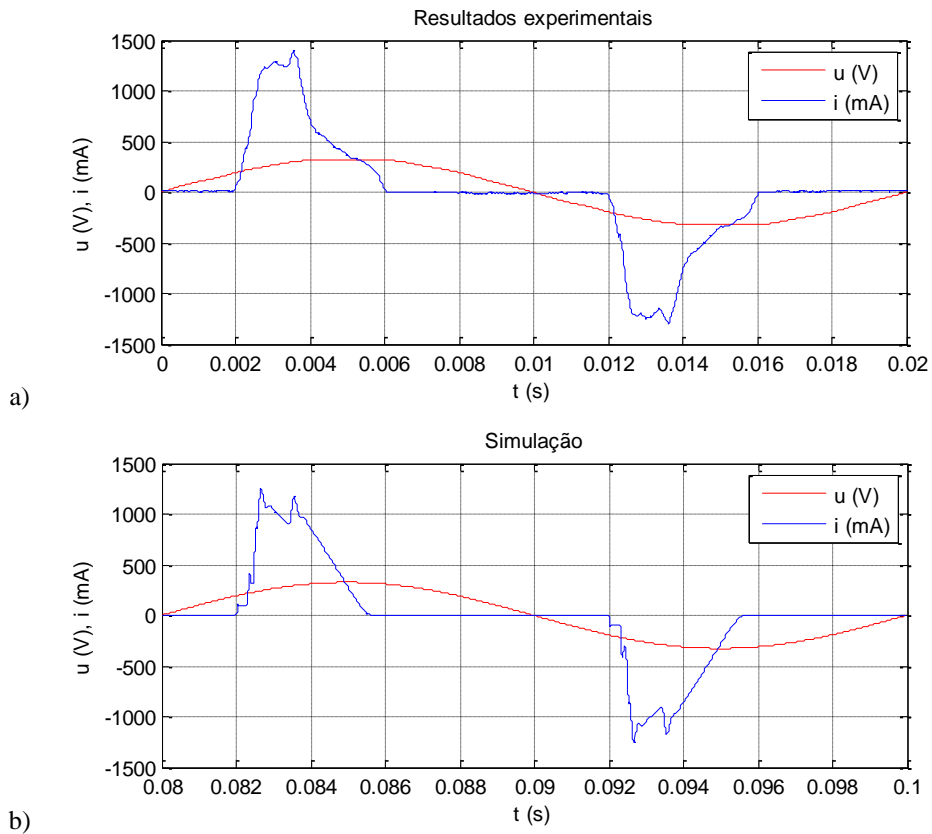


Figura 5.28 – Ensaio de 6 lâmpadas compactas fluorescentes em paralelo: formas de onda de corrente e tensão observadas: a) resultados experimentais, b) simulação

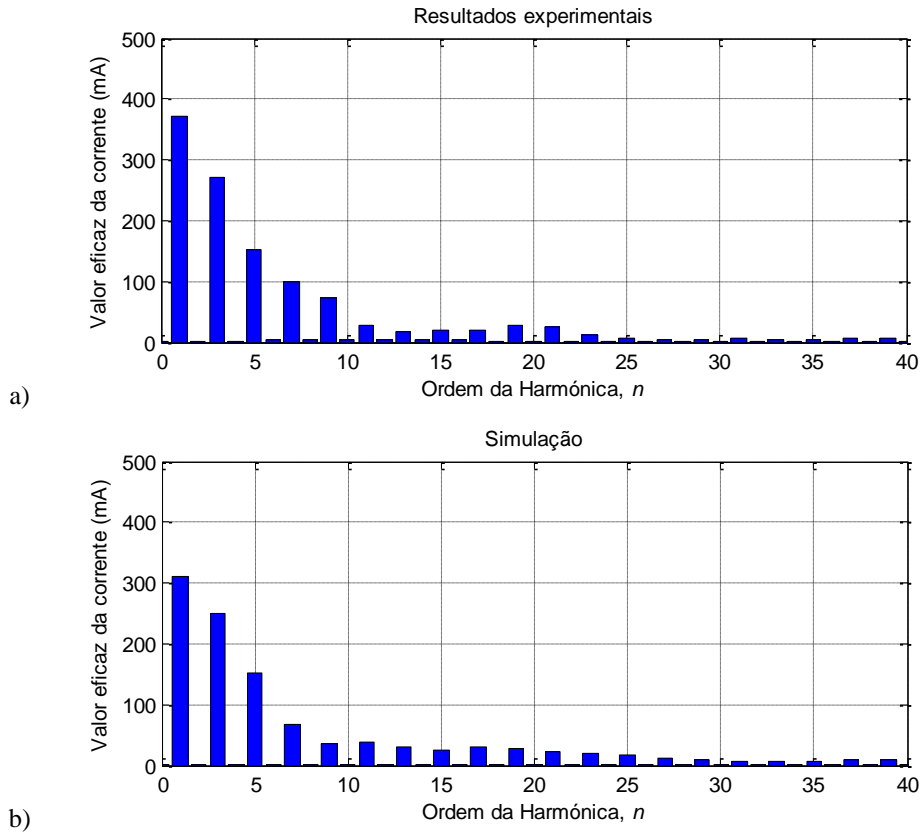


Figura 5.29 – Ensaio de 6 lâmpadas compactas fluorescentes em paralelo: espectro harmónico da corrente: a) resultados experimentais, b) simulação

5.3. Resultados experimentais numa instalação eléctrica trifásica com neutro

No ensaios seguinte pretende-se analisar o espectro harmónico das correntes numa instalação eléctrica trifásica com neutro, incluindo as correntes de fase e a corrente de neutro.

Conforme já referido, procurou-se distribuir as lâmpadas por cada fase em função da sua potência, isto é, tentou-se criar um sistema trifásico com carga equilibrada, dentro da medida do possível face às lâmpadas disponíveis. A distribuição das lâmpadas foi a seguinte: à fase 1 ligou-se a lâmpada de referência 1 (23W), à fase 2 ligou-se a lâmpada 5 (20W), enquanto na fase 3 se ligaram as lâmpadas de referências 3 e 11 (11 + 8 = 19W).

Nas tabelas seguintes são indicados os valores eficazes das correntes obtidas em cada fase e no condutor de neutro, nomeadamente as correntes totais I_1 , I_2 , I_3 e I_N , assim como as correntes harmónicas I_{nh} .

Nas figuras representam-se as formas de onda das tensões simples observadas, u_1 , u_2 e u_3 , das correntes de fase i_1 , i_2 , i_3 e da corrente de neutro i_N , assim como os espectros harmónicos das correntes.

5.3.1. Ensaio das lâmpadas distribuídas por 3 fases

Tabela 5.28 – Ensaio das lâmpadas distribuídas por 3 fases: correntes obtidas experimentalmente

$$I_1 = 146,23 \text{ mA}; I_2 = 133,25 \text{ mA}; I_3 = 145,91 \text{ mA}; I_N = 243,16 \text{ mA};$$

| Ordem da harmónica, n | I_{nh} fase 1 (mA) | I_{nh} fase 2 (mA) | I_{nh} fase 3 (mA) | I_{nh} neutro (mA) | Ordem da harmónica, n | I_{nh} fase 1 (mA) | I_{nh} fase 2 (mA) | I_{nh} fase 3 (mA) | I_{nh} neutro (mA) |
|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 99,47 | 94,10 | 105,77 | 5,14 | 21 | 9,09 | 9,61 | 2,76 | 21,89 |
| 2 | 0,39 | 0,47 | 0,50 | 0,34 | 22 | 0,34 | 0,33 | 0,31 | 0,07 |
| 3 | 75,66 | 68,60 | 76,44 | 221,55 | 23 | 7,67 | 6,86 | 1,59 | 6,82 |
| 4 | 0,26 | 0,17 | 0,37 | 0,56 | 24 | 0,14 | 0,32 | 0,10 | 0,60 |
| 5 | 46,67 | 40,71 | 44,33 | 11,26 | 25 | 6,69 | 6,36 | 2,17 | 9,90 |
| 6 | 0,81 | 0,65 | 0,63 | 0,97 | 26 | 0,42 | 0,14 | 0,08 | 0,67 |
| 7 | 36,17 | 31,85 | 32,78 | 5,30 | 27 | 6,71 | 4,83 | 2,45 | 9,61 |
| 8 | 1,21 | 0,57 | 0,81 | 1,24 | 28 | 0,71 | 0,11 | 0,10 | 0,35 |
| 9 | 32,80 | 24,13 | 25,17 | 82,19 | 29 | 5,14 | 5,14 | 3,83 | 6,20 |
| 10 | 1,50 | 0,20 | 0,71 | 1,28 | 30 | 0,85 | 0,09 | 0,12 | 0,50 |
| 11 | 22,16 | 11,20 | 12,11 | 7,99 | 31 | 4,63 | 5,61 | 3,46 | 10,17 |
| 12 | 1,67 | 0,38 | 0,36 | 1,08 | 32 | 0,78 | 0,14 | 0,17 | 0,22 |
| 13 | 13,28 | 9,52 | 7,21 | 11,05 | 33 | 4,94 | 4,29 | 3,84 | 5,52 |
| 14 | 1,58 | 0,43 | 0,23 | 1,17 | 34 | 0,69 | 0,22 | 0,23 | 0,10 |
| 15 | 11,08 | 9,16 | 4,72 | 28,37 | 35 | 3,88 | 3,82 | 4,59 | 6,82 |
| 16 | 1,22 | 0,33 | 0,26 | 0,74 | 36 | 0,67 | 0,14 | 0,30 | 0,16 |
| 17 | 6,86 | 8,57 | 2,60 | 3,49 | 37 | 3,50 | 3,40 | 4,03 | 9,42 |
| 18 | 0,98 | 0,24 | 0,29 | 1,01 | 38 | 0,70 | 0,02 | 0,24 | 0,49 |
| 19 | 6,74 | 11,27 | 4,75 | 9,94 | 39 | 3,58 | 2,88 | 4,34 | 1,85 |
| 20 | 0,69 | 0,16 | 0,29 | 0,59 | 40 | 0,55 | 0,09 | 0,38 | 0,13 |

Na tabela acima destacam-se a sombreado as harmónicas ímpares e múltiplas de 3 das correntes de fase, as quais se somam na corrente do neutro.

Assim sendo, é possível verificar que, em termos de valores eficazes, a corrente do neutro I_N é aproximadamente 165% da corrente numa fase. Ainda, a corrente eficaz no neutro corresponde a cerca de 250% da componente fundamental da corrente de cada fase, I_{1h} .

Desta forma, num sistema trifásico com cargas não lineares, a corrente no neutro assume valores significativamente superiores aos valores das correntes de fase.

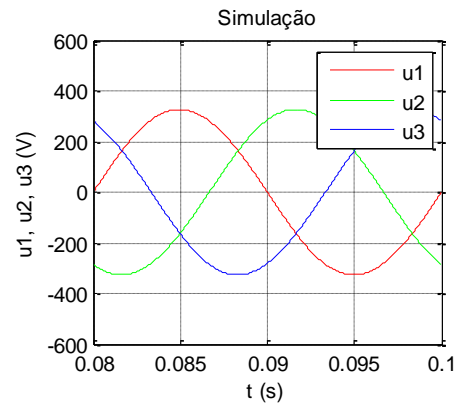
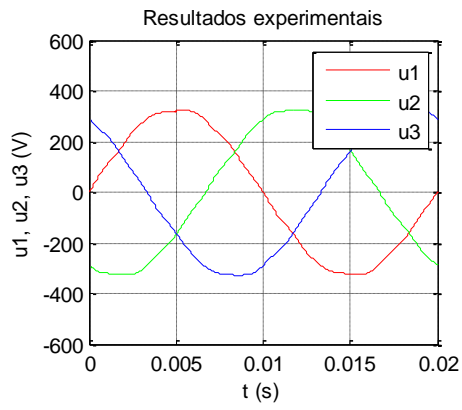


Figura 5.30 – Ensaio num sistema trifásico: formas de onda das tensões simples do sistema trifásico: a) resultados experimentais, b) simulação

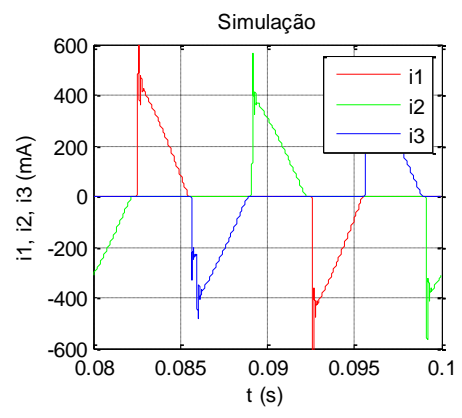
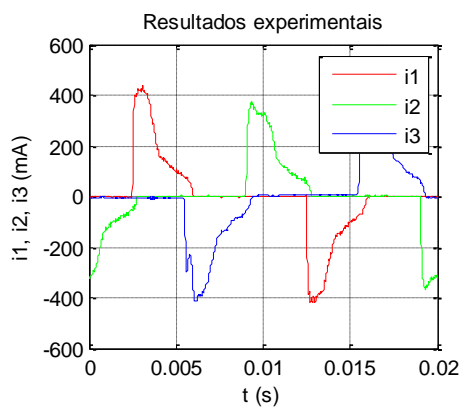


Figura 5.31 – Ensaio num sistema trifásico: formas de onda das correntes de fase do sistema trifásico: a) resultados experimentais, b) simulação

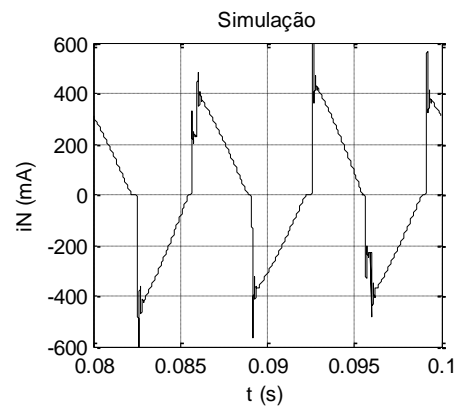
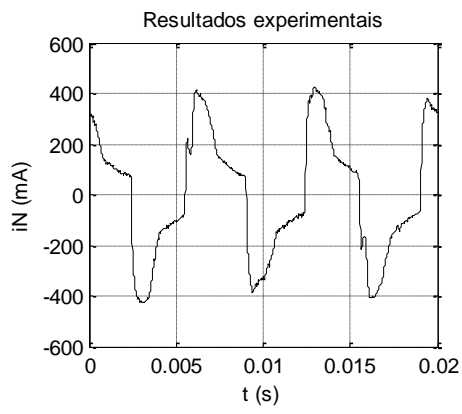


Figura 5.32 – Ensaio num sistema trifásico: formas de onda da corrente de neutro do sistema trifásico: a) resultados experimentais, b) simulação

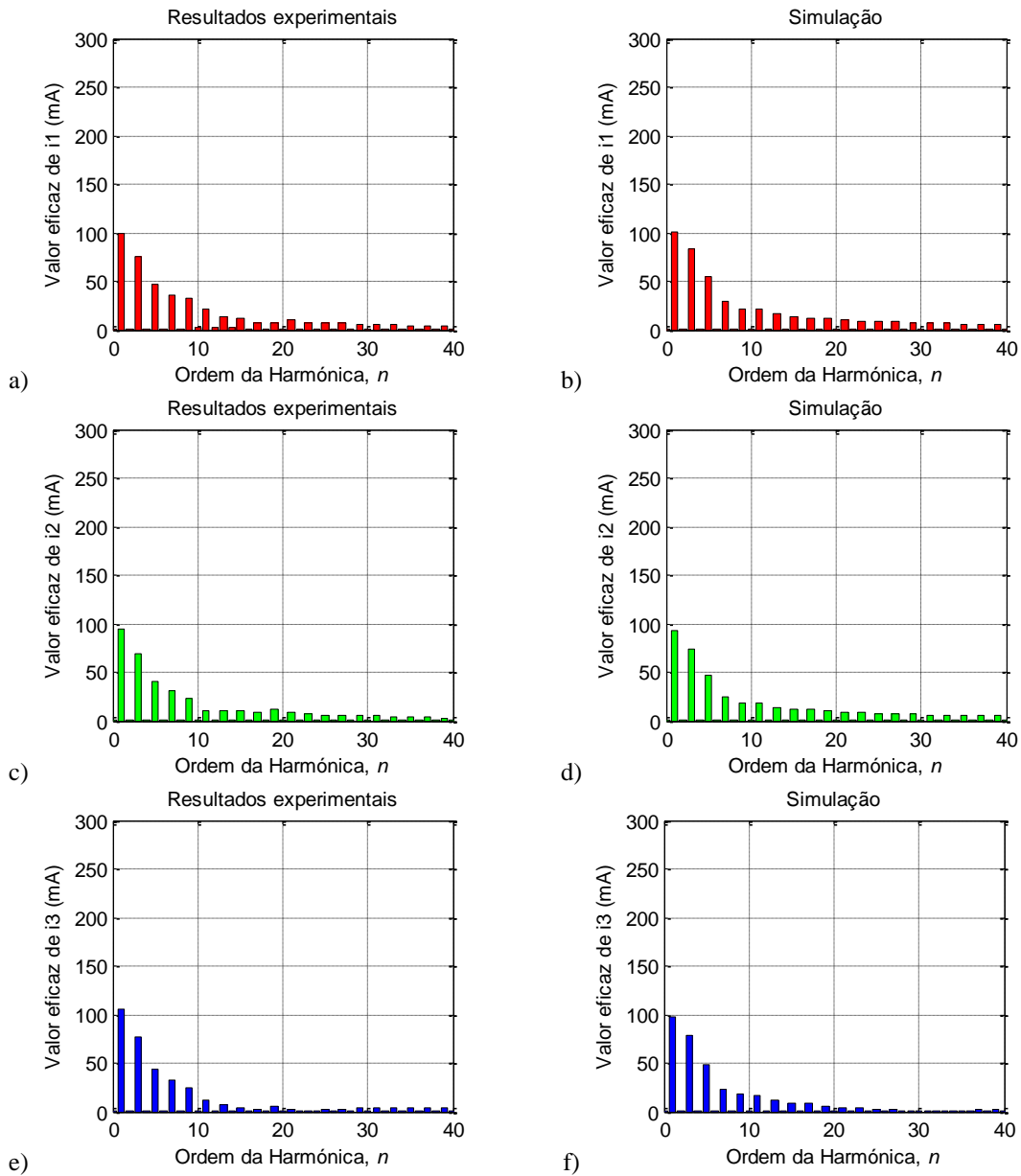


Figura 5.33 – Ensaio num sistema trifásico: espectro harmónico das correntes obtido experimentalmente: a) fase 1, c) fase 2, e) fase 3; espectro harmónico das correntes obtido através de simulação: b) fase 1, d) fase 2, f) fase 3

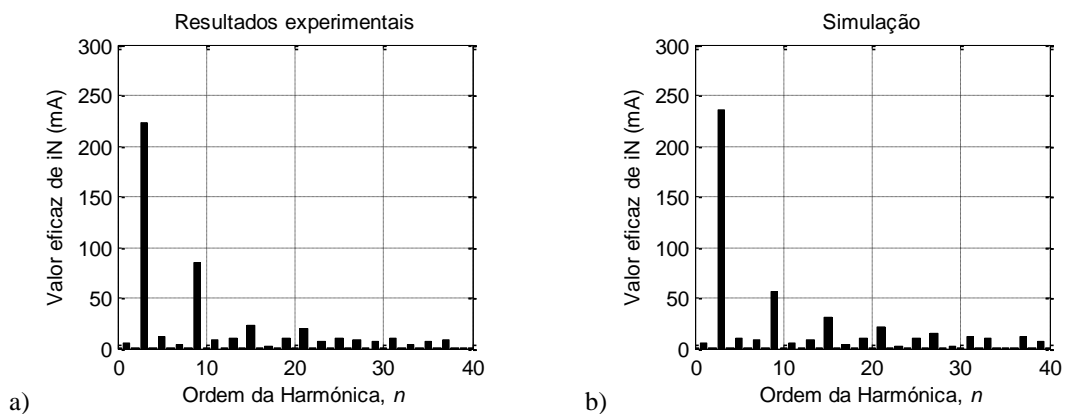


Figura 5.34 – Ensaio num sistema trifásico: espectro harmónico da corrente de neutro: a) resultados experimentais, b) simulação

5.4. Resumo de resultados

Nas tabelas seguintes resumem-se os valores de tensões, correntes, potências, distorções harmónicas, factores de potência e de desfasamento obtidos nos ensaios experimentais.

Tabela 5.29 – Resumo dos valores de tensões, correntes e distorções harmónicas obtidas em cada ensaio monofásico

| Ref. | Modelo | U (V) | U _{Ih} (V) | THD _U (%) | I (mA) | I _{Ih} (mA) | THD _I (%) |
|------|----------------------------------|--------|---------------------|----------------------|--------|----------------------|----------------------|
| 1 | DULUXSTAR MINI TWIST (23W) | 230,31 | 230,24 | 1,79 | 146,54 | 98,92 | 108,59 |
| 2 | DULUX INTELLIGENT SENSOR (15W) | 233,37 | 233,31 | 1,78 | 100,43 | 71,82 | 97,39 |
| 3 | DULUX EL LONGLIFE (11W) | 231,08 | 230,98 | 1,86 | 87,47 | 62,15 | 97,69 |
| 4 | DULUX SUPERSTAR CLASSIC A (5W) | 230,88 | 230,83 | 1,86 | 42,48 | 32,13 | 85,45 |
| 5 | DULUX EL LONGLIFE (20W) | 230,80 | 230,74 | 1,82 | 132,43 | 93,63 | 99,50 |
| 6 | DULUXSTAR (8W) | 230,88 | 230,87 | 1,81 | 57,21 | 38,62 | 108,82 |
| 7 | DULUXSTAR MINI BULLET T (7W) | 233,60 | 233,51 | 1,79 | 42,73 | 28,39 | 113,80 |
| 8 | DULUX EL ECONOMY (8W) | 230,18 | 230,11 | 1,91 | 61,62 | 31,86 | 163,22 |
| 9 | PARATHOM PAR16 (5W) | 233,86 | 233,72 | 1,70 | 33,59 | 17,29 | 166,66 |
| 10 | PARATHOM PRO PAR16 50 ADV. (10W) | 233,82 | 233,71 | 1,76 | 41,98 | 39,50 | 34,48 |
| | Lâmpadas 3 e 9 (11W + 5W) | 234,12 | 234,09 | 1,77 | 102,52 | 77,57 | 85,64 |
| | Lâmpadas 3 e 10 (11W + 10W) | 235,07 | 235,04 | 1,77 | 115,60 | 96,26 | 65,33 |
| | Lâmpadas 1, 3, 4, 5, 6 e 8 (75W) | 232,78 | 232,67 | 1,63 | 503,84 | 372,15 | 91,36 |

Na tabela seguinte, define-se I_{m3} como sendo a corrente eficaz total que resulta da soma das componentes harmónicas ímpares múltiplas de 3, $n = 3(2k-1)$, pela seguinte expressão:

$$I_{m3} = \sqrt{\sum_{n=3(2k-1)}^{40} I_{nh}^2} = \sqrt{I_{3h}^2 + I_{9h}^2 + I_{15h}^2 + I_{21h}^2 + I_{27h}^2 + I_{33h}^2 + I_{39h}^2} \quad (5.1)$$

Tabela 5.30 – Resumo dos valores de correntes obtidas em cada ensaio monofásico

| Ref. | Modelo | I (mA) | I _{Ih} (mA) | I _{Ih} / I (%) | I _{m3} (mA) | I _{m3} / I (%) | I _{m3} / I _{Ih} (%) |
|------|----------------------------------|--------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| 1 | DULUXSTAR MINI TWIST (23W) | 146,54 | 98,92 | 67,50 | 83,25 | 56,81 | 84,16 |
| 2 | DULUX INTELLIGENT SENSOR (15W) | 100,43 | 71,82 | 71,51 | 56,07 | 55,83 | 78,08 |
| 3 | DULUX EL LONGLIFE (11W) | 87,47 | 62,15 | 71,05 | 47,38 | 54,16 | 76,24 |
| 4 | DULUX SUPERSTAR CLASSIC A (5W) | 42,48 | 32,13 | 75,64 | 21,81 | 51,35 | 67,88 |
| 5 | DULUX EL LONGLIFE (20W) | 132,43 | 93,63 | 70,70 | 74,47 | 56,23 | 79,53 |
| 6 | DULUXSTAR (8W) | 57,21 | 38,62 | 67,51 | 32,45 | 56,72 | 84,02 |
| 7 | DULUXSTAR MINI BULLET T (7W) | 42,73 | 28,39 | 66,44 | 25,01 | 58,53 | 88,09 |
| 8 | DULUX EL ECONOMY (8W) | 61,62 | 31,86 | 51,70 | 35,20 | 57,13 | 110,50 |
| 9 | PARATHOM PAR16 (5W) | 33,59 | 17,29 | 51,47 | 19,13 | 56,94 | 110,62 |
| 10 | PARATHOM PRO PAR16 50 ADV. (10W) | 41,98 | 39,50 | 94,08 | 13,10 | 31,21 | 33,17 |
| | Lâmpadas 3 e 9 (11W + 5W) | 102,52 | 77,57 | 75,66 | 56,81 | 55,42 | 73,24 |
| | Lâmpadas 3 e 10 (11W + 10W) | 115,60 | 96,26 | 83,27 | 51,54 | 44,58 | 53,54 |
| | Lâmpadas 1, 3, 4, 5, 6 e 8 (75W) | 503,84 | 372,15 | 73,86 | 282,25 | 56,02 | 75,84 |

Tabela 5.31 – Resumo dos valores de potências, factores de potência e de desfasamento obtidos em cada ensaio monofásico

| Ref. | Modelo | P (W) | Q (var) | S (VA) | D (VA) | PF | DPF |
|------|----------------------------------|-------|---------|--------|--------|------|------|
| 1 | DULUXSTAR MINI TWIST (23W) | 20,80 | -9,39 | 33,75 | 24,89 | 0,62 | 0,91 |
| 2 | DULUX INTELLIGENT SENSOR (15W) | 15,15 | -7,25 | 23,44 | 16,38 | 0,65 | 0,90 |
| 3 | DULUX EL LONGLIFE (11W) | 12,75 | -6,69 | 20,21 | 14,24 | 0,63 | 0,88 |
| 4 | DULUX SUPERSTAR CLASSIC A (5W) | 6,13 | -4,21 | 9,81 | 6,41 | 0,63 | 0,83 |
| 5 | DULUX EL LONGLIFE (20W) | 19,62 | -9,14 | 30,57 | 21,64 | 0,64 | 0,91 |
| 6 | DULUXSTAR (8W) | 7,86 | -4,25 | 13,21 | 9,74 | 0,60 | 0,88 |
| 7 | DULUXSTAR MINI BULLET T (7W) | 6,10 | -2,64 | 9,98 | 7,52 | 0,61 | 0,92 |
| 8 | DULUX EL ECONOMY (8W) | 7,06 | -1,96 | 14,18 | 12,15 | 0,50 | 0,96 |
| 9 | PARATHOM PAR16 (5W) | 3,94 | -0,64 | 7,86 | 6,73 | 0,50 | 0,99 |
| 10 | PARATHOM PRO PAR16 50 ADV. (10W) | 9,16 | -1,19 | 9,82 | 3,37 | 0,93 | 0,99 |
| | Lâmpadas 3 e 9 (11W + 5W) | 16,65 | -7,27 | 24,00 | 15,73 | 0,69 | 0,92 |
| | Lâmpadas 3 e 10 (11W + 10W) | 21,42 | -7,49 | 27,17 | 15,00 | 0,79 | 0,94 |
| | Lâmpadas 1, 3, 4, 5, 6 e 8 (75W) | 77,89 | -38,16 | 117,28 | 79,17 | 0,66 | 0,90 |

Tabela 5.32 – Resumo dos valores de correntes obtidos no ensaio trifásico

$I_1 = 146,23 \text{ mA}$; $I_2 = 133,25 \text{ mA}$; $I_3 = 145,91 \text{ mA}$; $I_N = 243,16 \text{ mA}$;

| Ordem da harmónica, n | I_{nh} fase 1 (mA) | I_{nh} fase 2 (mA) | I_{nh} fase 3 (mA) | I_{nh} neutro (mA) | Ordem da harmónica, n | I_{nh} fase 1 (mA) | I_{nh} fase 2 (mA) | I_{nh} fase 3 (mA) | I_{nh} neutro (mA) |
|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 99,47 | 94,10 | 105,77 | 5,14 | 21 | 9,09 | 9,61 | 2,76 | 21,89 |
| 2 | 0,39 | 0,47 | 0,50 | 0,34 | 22 | 0,34 | 0,33 | 0,31 | 0,07 |
| 3 | 75,66 | 68,60 | 76,44 | 221,55 | 23 | 7,67 | 6,86 | 1,59 | 6,82 |
| 4 | 0,26 | 0,17 | 0,37 | 0,56 | 24 | 0,14 | 0,32 | 0,10 | 0,60 |
| 5 | 46,67 | 40,71 | 44,33 | 11,26 | 25 | 6,69 | 6,36 | 2,17 | 9,90 |
| 6 | 0,81 | 0,65 | 0,63 | 0,97 | 26 | 0,42 | 0,14 | 0,08 | 0,67 |
| 7 | 36,17 | 31,85 | 32,78 | 5,30 | 27 | 6,71 | 4,83 | 2,45 | 9,61 |
| 8 | 1,21 | 0,57 | 0,81 | 1,24 | 28 | 0,71 | 0,11 | 0,10 | 0,35 |
| 9 | 32,80 | 24,13 | 25,17 | 82,19 | 29 | 5,14 | 5,14 | 3,83 | 6,20 |
| 10 | 1,50 | 0,20 | 0,71 | 1,28 | 30 | 0,85 | 0,09 | 0,12 | 0,50 |
| 11 | 22,16 | 11,20 | 12,11 | 7,99 | 31 | 4,63 | 5,61 | 3,46 | 10,17 |
| 12 | 1,67 | 0,38 | 0,36 | 1,08 | 32 | 0,78 | 0,14 | 0,17 | 0,22 |
| 13 | 13,28 | 9,52 | 7,21 | 11,05 | 33 | 4,94 | 4,29 | 3,84 | 5,52 |
| 14 | 1,58 | 0,43 | 0,23 | 1,17 | 34 | 0,69 | 0,22 | 0,23 | 0,10 |
| 15 | 11,08 | 9,16 | 4,72 | 28,37 | 35 | 3,88 | 3,82 | 4,59 | 6,82 |
| 16 | 1,22 | 0,33 | 0,26 | 0,74 | 36 | 0,67 | 0,14 | 0,30 | 0,16 |
| 17 | 6,86 | 8,57 | 2,60 | 3,49 | 37 | 3,50 | 3,40 | 4,03 | 9,42 |
| 18 | 0,98 | 0,24 | 0,29 | 1,01 | 38 | 0,70 | 0,02 | 0,24 | 0,49 |
| 19 | 6,74 | 11,27 | 4,75 | 9,94 | 39 | 3,58 | 2,88 | 4,34 | 1,85 |
| 20 | 0,69 | 0,16 | 0,29 | 0,59 | 40 | 0,55 | 0,09 | 0,38 | 0,13 |

6. Conclusões e propostas de trabalhos futuros

6.1. Conclusões

Analisando os resultados das tabelas 5.29 e 5.30, é possível verificar o forte conteúdo harmónico de corrente existente nas lâmpadas ensaiadas, indicado pelas taxas de distorção harmónica de corrente de aproximadamente 80% a 160%, assim como pela diferença acentuada entre o valor eficaz total da corrente, I , e a componente fundamental, I_{1h} . Em condições ideais, isto é, com uma carga linear sem componentes harmónicas, ter-se-ia uma THD_I nula e o valor eficaz da componente fundamental da corrente seria igual ao valor eficaz total de corrente.

Face aos resultados indicados na tabela 5.31, conclui-se que os factores de potência medidos experimentalmente se encontram próximos dos valores especificados pelo fabricante das lâmpadas, tal como os valores de potência activa total indicados na tabela 3.1. Para praticamente todas as lâmpadas em questão, destaca-se o elevado valor de potência deformante registado nos ensaios, o qual representa um indicador adicional do conteúdo harmónico existente e que consequentemente contribui para o aumento da potência aparente.

Importa ainda referir as diferenças entre factor de potência, PF, e factor de desfasamento, DPF. Em condições de tensão e corrente sinusoidais, sem qualquer existência de conteúdo harmónico diferente da componente fundamental, o factor de potência é igual ao factor de desfasamento. No entanto, na presença de distorção harmónica causada por cargas não lineares, esta igualdade não se verifica. Isto deve-se ao facto de o factor de desfasamento apenas contabilizar o contributo da componente fundamental, nomeadamente a relação entre a potência activa e a potência aparente associadas à frequência fundamental da rede eléctrica.

Por sua vez, o factor de potência representa o quociente entre a potência activa total e a potência aparente total, incluindo os efeitos das componentes harmónicas. Em regra, na presença de cargas não lineares, o factor de potência será inferior ao factor de

desfasamento dado que o conteúdo harmónico presente na corrente origina potência deformante.

Tendo em conta as formas de onda de corrente observadas, a maior parte das lâmpadas aparenta um comportamento característico de um rectificador monofásico em ponte não controlado com uma carga capacitiva, conforme referido na secção 3.3. Os espectros harmónicos de corrente também se enquadram no âmbito previsto, isto é, a predominância de harmónicas de ordem ímpar ($n = 1, 3, 5, \dots$) e a inexistência de harmónicas de ordem par ($n = 2, 4, 6, \dots$).

A única excepção consiste na lâmpada de LED Parathom Pro PAR16 Advanced (referência 10), a qual deverá conter um circuito eléctrico com uma tipologia diferente. De facto, em todos os parâmetros medidos esta lâmpada apresentou resultados distintos, tais como a mais baixa THD_I registada, uma potência deformante de valor reduzido e um factor de potência relativamente próximo da unidade. Adicionalmente, a sua forma de onda de corrente na figura 5.22 não apresenta semelhanças com as formas de onda das outras lâmpadas ensaiadas, o que consolida a hipótese da utilização de um outro tipo de circuito eléctrico.

No que diz respeito ao cumprimento da norma IEC 61000-3-2 relacionada com a emissão de harmónicas de corrente, a maioria das lâmpadas ensaiadas satisfazem os critérios estipulados na norma referida, através de um dos dois conjuntos de regras abordados no subcapítulo 3.2.1. Segundo os dados recolhidos nos ensaios experimentais, as únicas lâmpadas que aparentam não cumprir a norma IEC 61000-3-2 são as lâmpadas Dulux EL Economy e Parathom PAR16, de referências 8 e 9, respectivamente.

No entanto, é de salientar que os valores obtidos nos ensaios não apresentam diferenças significativas face aos requisitos da normalização em vigor. Adicionalmente, considera-se que os ensaios foram realizados em condições laboratoriais não ideais, isto é, as lâmpadas foram alimentadas pela rede de distribuição eléctrica, a qual pode apresentar características variáveis que influenciem os resultados dos ensaios. Como tal, crê-se que em condições ideais de medição todas as lâmpadas se encontrarão em conformidade com a norma IEC 61000-3-2.

Apesar de as lâmpadas ensaiadas neste trabalho serem provenientes de um fabricante de referência que cumpre a normalização relativa à emissão de conteúdo harmónico, este tipo de cargas não lineares tem implicações significativas na corrente do condutor neutro, quando as lâmpadas em questão são utilizadas em instalações eléctricas trifásicas. Salienta-se ainda o facto da possibilidade da existência de outras lâmpadas deste tipo disponíveis no mercado, provenientes de outros fabricantes, cujo conteúdo harmónico não é conhecido e que poderão ter consequências mais prejudiciais para as instalações eléctricas.

No primeiro ensaio de lâmpadas em paralelo, em que foi utilizada uma lâmpada compacta fluorescente em paralelo com uma lâmpada de LED, respectivamente as lâmpadas de referências 3 e 9, verificou-se que a forma de onda de corrente obtida e o espectro harmónico são semelhantes aos obtidos individualmente, com as devidas diferenças devido às amplitudes harmónicas superiores. Apesar de as duas lâmpadas utilizarem tecnologias de iluminação diferentes, o circuito utilizado em ambas aparenta ser igual, do tipo rectificador com carga capacitiva já descrito. Na forma de onda da corrente, figura 5.24, são ainda visíveis dois picos distintos, sendo que cada um deles corresponde ao momento de carga do condensador para cada lâmpada.

Já no segundo ensaio em paralelo, utilizou-se a mesma lâmpada fluorescente compacta (3), mas desta vez em paralelo com outra lâmpada de LED, a lâmpada 10, a qual deverá ter um circuito diferente.

No terceiro ensaio em paralelo foram ligadas seis lâmpadas fluorescentes compactas em simultâneo. Neste caso, tal como nos restantes ensaios em paralelo, verificou-se apenas a existência de componentes harmónicas ímpares, sendo que as formas de onda da corrente total obtida representam a soma das correntes individuais solicitadas por cada lâmpada.

No que diz respeito ao ensaio realizado numa instalação eléctrica trifásica e tendo em conta as lâmpadas utilizadas, verificou-se que as correntes em cada fase e os seus espectros harmónicos são semelhantes aos resultados obtidos individualmente para cada lâmpada, ou seja, apresentando igualmente apenas harmónicas de ordem ímpar.

Tratando-se de um sistema trifásico com a carga aproximadamente equilibrada entre as três fases, verificou-se que a maioria das correntes harmónicas presentes nas fases praticamente se anularam no neutro, à excepção das harmónicas ímpares múltiplas de 3, $n = 3(2k-1)$, ou seja, $n = 3, 9, 15$, etc. Assim sendo, estas componentes harmónicas ímpares e múltiplas de 3 das correntes de fase consistem sistemas homopolares de corrente e, conseqüentemente, a corrente de neutro resulta da soma aritmética das componentes harmónicas de ordem $n = 3(2k-1)$ das correntes de fase, como evidenciado pelos resultados indicados na tabela 5.28.

De acordo com as Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão, é indicado que mesmo em instalações trifásicas com carga equilibrada as correntes harmónicas de fase podem originar sobreintensidades no condutor neutro [19]. Este fenómeno é observado nos resultados que constam da tabela 5.28, sendo que a presença de cargas não lineares faz com que a corrente no neutro assuma valores significativamente superiores aos valores das correntes de fase.

Desta forma, na presença de cargas não lineares dever-se-á ter cuidados especiais com o condutor neutro, nomeadamente em termos de dimensionamento para poder suportar correntes superiores às das fases, o que para canalizações constituídas por cabos multicondutores implica que o dimensionamento seja feito para a corrente de neutro. No caso de a canalização ser constituída por condutores protegidos mecanicamente por condutas ou por cabos monocondutores, poderão ser usadas secções diferentes para os condutores de fase e neutro, de acordo com a secção 524.3 das Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão [19].

Apesar de o dimensionamento dos circuitos das instalações eléctricas ser normalmente feito em função da potência activa, o conteúdo harmónico produzido pelas cargas não lineares pode dar origem a uma potência aparente significativamente superior. Assim sendo, este parâmetro deverá ser também considerado para o correcto dimensionamento das instalações eléctricas.

6.2. Propostas de trabalhos futuros

Como proposta para trabalho futuro, sugere-se utilizar o *hardware* e/ou *software* desenvolvidos neste trabalho como base para a criação de um sistema autónomo com funcionalidades semelhantes às de um analisador de redes trifásicas.

Desta forma, sugere-se o desenvolvimento de módulos de *hardware* adicionais para a análise de dados simultânea nas três fases e no condutor de neutro, assim como a implementação de um microcontrolador para registo dos dados em cartão de memória.

Esta sugestão tem em vista a análise harmónica das correntes de um sistema trifásico com cargas lineares e não lineares, como por exemplo a instalação eléctrica já existente num dado edifício. Adicionalmente, poderá ser realizado um estudo sobre a influência das cargas não lineares no dimensionamento de canalizações em instalações eléctricas de baixa tensão, incluindo a escolha dos dispositivos de protecção face à distorção harmónica na corrente de serviço usada para dimensionamento das canalizações.

Referências Bibliográficas

- [1] IEC, IEC 61000-4-7, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, 1991.
- [2] IEC, IEC 61000-3-2, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2 - Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase), 2009.
- [3] J. C. Soares, *Arquitetura e Luz, Estratégias de Iluminação – Teatro Capitólio (Dissertação de Mestrado)*, Faculdade de Arquitectura – Universidade Técnica de Lisboa, 2011.
- [4] R. Rodrigues, *Princípios Básicos de Iluminação*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010.
- [5] S. M. N. Ramos, *Avaliação do potencial de redução do consumo de Energia Eléctrica - Iluminação no Sector Doméstico (Dissertação de Mestrado)*, Universidade de Aveiro, 2008.
- [6] R. S. d. S. Gonçalves, *Eficiência energética na parte comum dos edifícios coletivos (Dissertação de Mestrado)*, Escola Superior de Tecnologia e Gestão – Instituto Politécnico de Bragança, 2011.
- [7] OSRAM, “Alternativas para lâmpadas incandescentes – Directiva EU – Iluminação doméstica,” OSRAM, [Online]. Available: http://www.osram.pt/osram_pt/Consumidor/Iluminacao_para_casa/Alternativas_para_lmpadas_incandescentes/Directiva_EU__Iluminao_domstica_/index.html.
- [8] A. M. Carlinhos, *Utilização Eficiente de Sistemas de Iluminação (Dissertação de Mestrado)*, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- [9] C. G. M. d. Silva, *Diagnóstico sobre a utilização das lâmpadas fluorescentes compactas (LFC) como promotoras de eficiência energética nos sistemas de iluminação no Brasil (Dissertação de Mestrado)*, Universidade de São Paulo, 2008.
- [10] A. J. N. Bicho, *Utilização racional de Energia Eléctrica no Município de Vila*

Franca de Xira - Casos de Estudo (Dissertação de Mestrado), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2011.

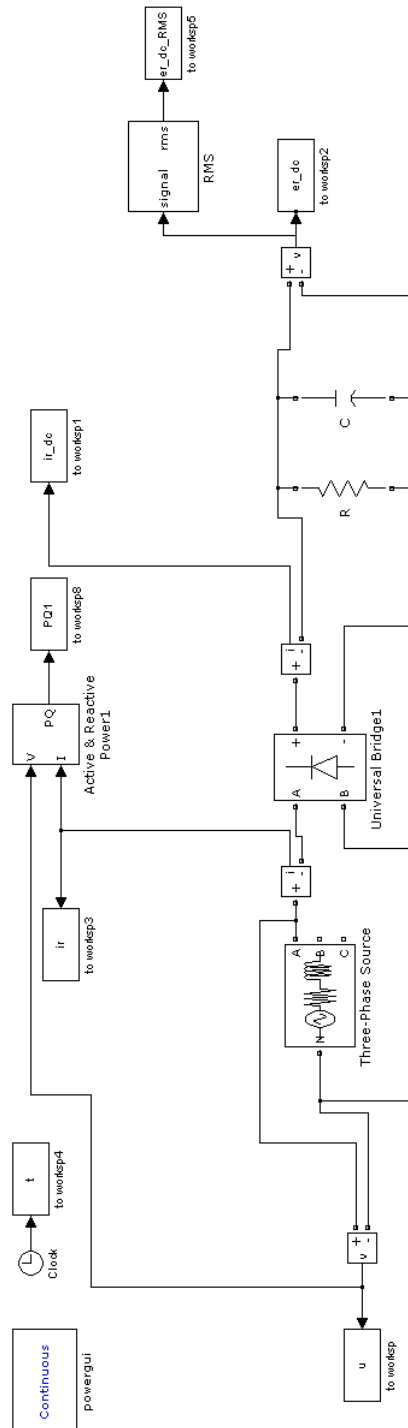
- [11] Instituto Português da Qualidade, NP EN 50160 - Características da Tensão Fornecida pelas Redes de Distribuição Pública de Energia Eléctrica, 2001.
- [12] Z. Wei, N. R. Watson e L. P. Frater, *Modelling of Compact Fluorescent Lamps*, IEEE, 2008.
- [13] National Instruments, “NI 6023E/6024E/6025E Family Specifications,” [Online]. Available:
<http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/91DE6638D38E621A862570CF006F23D1>.
- [14] National Instruments, “BNC-2120 Installation Guide,” [Online]. Available:
<http://digital.ni.com/manuals.nsf/websearch/7BF8B272547BE08186257A76005F73CA>.
- [15] LEM, “Voltage Transducer LV 25-P,” [Online]. Available:
<http://www.lem.com/docs/products/lv%2025-p.pdf>.
- [16] LEM, “Current Transducer LA 25-NP,” [Online]. Available:
<http://www.lem.com/docs/products/la%2025-np.pdf>.
- [17] National Instruments, “FFT Fundamentals (Sound and Vibration Measurement Suite),” [Online]. Available: http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372416B-01/svtconcepts/fft_funda/.
- [18] National Instruments, “The Fundamentals of FFT-Based Signal Analysis and Measurement in LabVIEW and LabWindows/CVI,” [Online]. Available:
<http://www.ni.com/white-paper/4278/en/>.
- [19] DGGE, RTIEBT – Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão, 1ª Edição Anotada, 2006.
- [20] N. Mohan, T. M. Undeland e W. P. Robbins, *Power Electronics - Converters, Applications, and Design (Second Edition)*, Wiley, 1995.
- [21] M. H. Rashid, *Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications (Second Edition)*, Prentice Hall, 1993.
- [22] A. V. Oppenheim e R. W. Schaffer, *Digital Signal Processing*, Prentice Hall, 1975.
- [23] V. Soares, *Sebenta da Unidade Curricular de Aquisição e Processamento de*

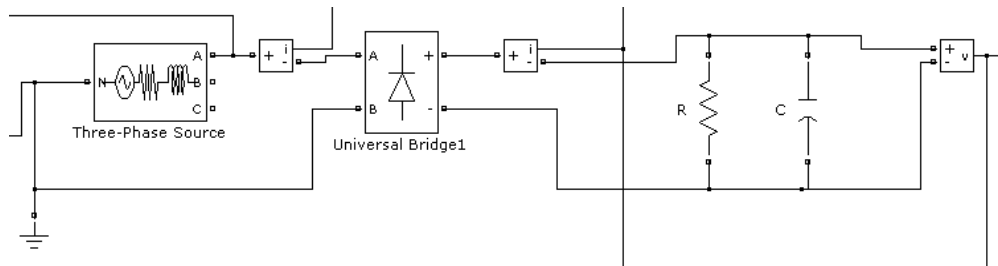
Sinais, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2012.

Anexos

Anexo 1 – Modelo implementado em MATLAB/Simulink para simulações

O modelo implementado, representado na figura seguinte, utiliza diversos blocos da biblioteca *SimPowerSystems*, recorrendo ao método de integração *ode4* (*Runge-Kutta*) com um passo de integração fixo de $0,1 \mu\text{s}$.





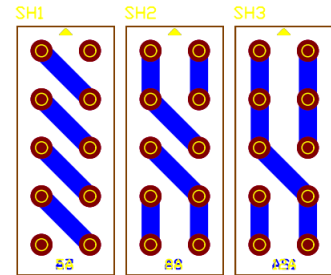
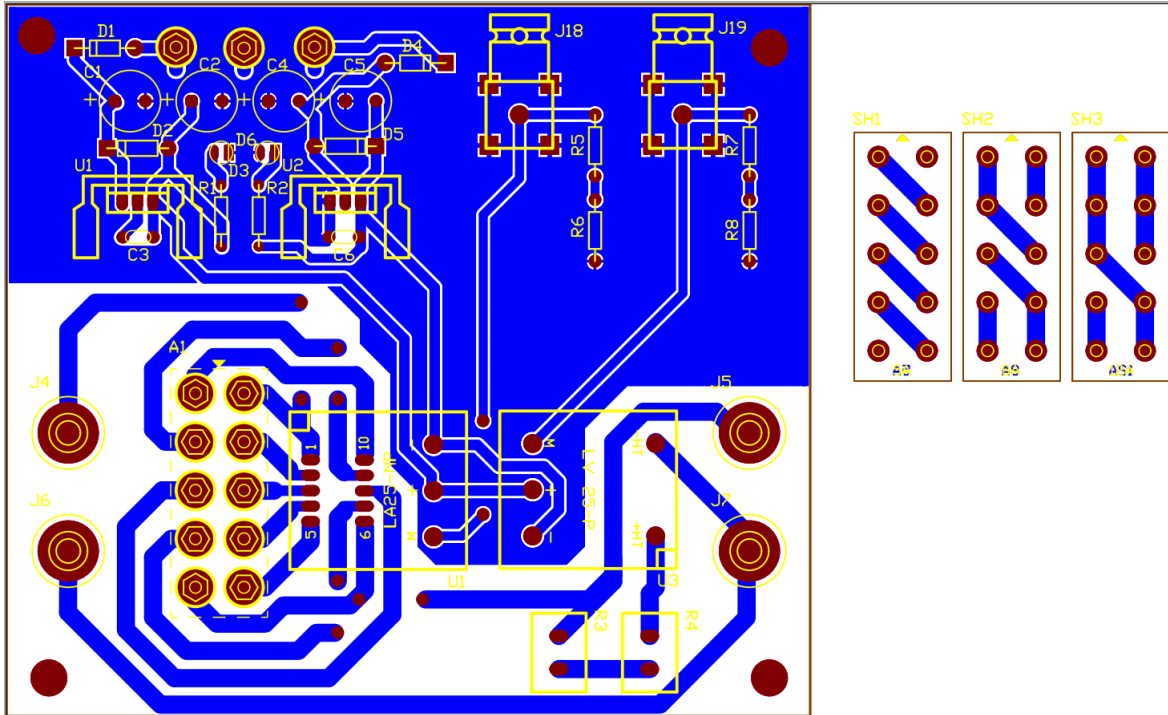
O bloco *Three-Phase Source* gera um sistema trifásico de tensões em estrela, possuindo terminais para cada uma das tensões simples (A, B, C) e para o condutor de neutro (N).

O bloco *Universal Bridge* representa o rectificador monofásico não controlado em ponte, cuja carga do tipo RC representa a lâmpada em análise. Assim sendo, na figura acima existe apenas uma lâmpada ligada à fase 1 do sistema de tensões.

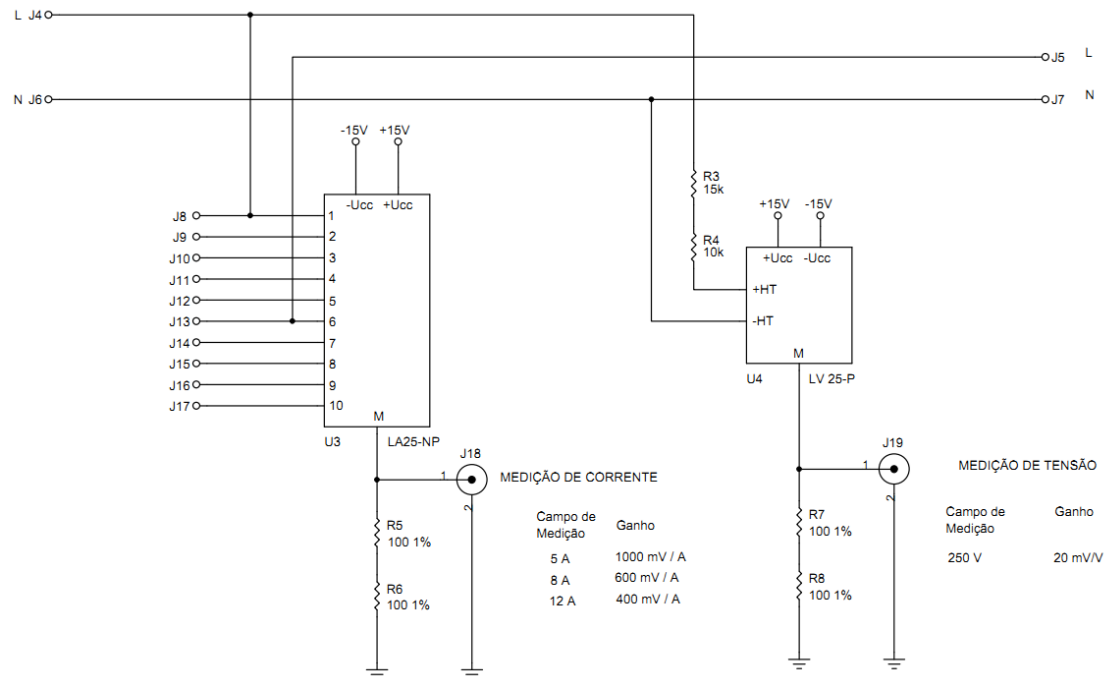
Para simular um sistema trifásico com uma lâmpada em cada uma das três fases, será necessário apenas criar dois novos rectificadores, com as respectivas cargas RC, e ligá-los respectivamente aos terminais B e C do bloco *Three-Phase Source*, assim como ao condutor de neutro N.

Existem ainda vários blocos para medição de tensão ou corrente, para exportação para o *workspace* do MATLAB e ainda janelas de observação das formas de onda.

Anexo 2 – Placa de circuito impresso do condicionador de sinal



ENTRADA:
250 Vef Máx.
12 Aef Máx.



Anexo 3 – Código em MATLAB para comparação de resultados com LabVIEW

```
f=50;
t=0:1e-6:0.1;
s=0.2+0.2*sawtooth(2*pi*f*t);

% periodo = 1/f
per=1/f;

tf=0.1-per;           % tempo final: fim do penúltimo periodo
ti=tf-per;           % tempo inicial: início do penúltimo periodo

n=1;

while (t(n)<ti)
    n=n+1;
end

ni=n;                 % posição do vector t() correspondente ao tempo
inicial

while (t(n)<tf)
    n=n+1;
end

nf=n;                 % posição do vector t() correspondente ao tempo
final

na=nf-ni;

%-----

nh=40;                % harmónica máxima a detectar

%-----

fft_ir=abs( fft(s(ni:nf)) );

fft_ir(1)=fft_ir(1)/2;
% o valor médio está reduzido de 'na', e as harmónicas de 'na/2'

fft_ir=fft_ir/(na/2);

for n=1:(nh+1)
    espectro(n)=fft_ir(n);
end

for n=1:(nh+1)
    if n==1
```

```

        espectro_eficaz(n)=espectro(n);      % valor médio = componente
DC
    else
        espectro_eficaz(n)=espectro(n)/sqrt(2);
    end
end

%-----

% plots do espectro harmónico
hFig = figure(1);
set(hFig, 'Position', [200 200 600 330]) % x y largura altura
figure(1)
plot(t,s,'b'); grid off;
xlabel('t (s)');
ylabel('dente de serra - f(t)');
axis([min(t) max(t) -0.1 0.5]);

figure(2)
bar(0:nh,espectro_eficaz(1:nh+1),'b');
axis([0 nh 0 0.2]);
ylabel('Valor eficaz'); grid on;
xlabel('Ordem da Harmónica, {\itn}')

figure(3)
bar(0:nh,espectro(1:nh+1),'b');
axis([0 nh 0 0.2]);
ylabel('Amplitude'); grid on;
xlabel('Ordem da Harmónica, {\itn}')

```

Anexo 4 – Código em MATLAB para tratamento dos dados adquiridos experimentalmente

```
% determinar tamanho dos vectores
tamanho=length (au);

t=0:1e-5:0.02;

if tamanho == 40
    f=50:50:40*50;           % vector das frequências
end

% determinar posição da fundamental
k=1;
while (f(k)~=50) % not equal to 50 (fundamental)
    k=k+1;
end

pos_1h=k;

% determinar posição da 3ª harmónica
k=pos_1h;
while (f(k)~=150) % not equal to 150 (3ª harmónica)
    k=k+1;
end

pos_3h=k;

% determinar posição da 5ª harmónica
k=pos_3h;
while (f(k)~=250) % not equal to 250 (5ª harmónica)
    k=k+1;
end

pos_5h=k;

% limites dados pela IEC 61000-3-2
perc_3h=100*i (pos_3h)/i (pos_1h); % i3h <= 86% i1h
perc_5h=100*i (pos_5h)/i (pos_1h); % i5h <= 61% i1h

s1=['i3h = ',sprintf('%0.2f', perc_3h),'% de i1h'];
s2=['i5h = ',sprintf('%0.2f', perc_5h),'% de i1h'];

% alpha unh e inh: graus -> rad
for n=1:1:tamanho
    au(n)=au(n)*pi/180;
    ai(n)=ai(n)*pi/180;
end
```

```

% unh = unhRMS * sqrt(2) * cos(nwt + alpha unh)
for n=1:1:tamanho
    if f(n)==0
        eval(['ur' num2str(n) '= u(n)*cos(2*pi*f(n)*t +au(n));']);
    else
        eval(['ur' num2str(n) '= u(n)*sqrt(2)*cos(2*pi*f(n)*t
+au(n));']);
    end
end

% inh = inhRMS * sqrt(2) * cos(nwt + alpha inh)
for n=1:1:tamanho
    if f(n)==0
        eval(['ir' num2str(n) '= i(n)*cos(2*pi*f(n)*t +ai(n));']);
    else
        eval(['ir' num2str(n) '= i(n)*sqrt(2)*cos(2*pi*f(n)*t
+ai(n));']);
    end
end

utotal=0;
itotal=0;

% somatório unh e inh
for n=1:1:tamanho
    eval(['utotal = utotal + ur' num2str(n) ';'']);
    eval(['itotal = itotal + ir' num2str(n) ';'']);
end

i_max=max(itotal);
i_min=min(itotal);

% detectar valor absoluto máximo entre os picos de corrente positivo e
negativo
if (abs(i_max) >= abs(i_min))
    ip_abs=abs(i_max);
else
    ip_abs=abs(i_min);
end

% determinar se o 1º valor do vector da tensão é positivo ou negativo
if (utotal(1)>=0)
    positivo=1;
elseif (utotal(1)<0)
    positivo=0;
else
    fprintf('erro!');
end

% detectar passagem da tensão por zero
k=1;

if positivo==1
    while (utotal(k)>0)
        k=k+1;
    end
end

```

```

elseif positivo==0
    while (utotal(k)<0)
        k=k+1;
    end
end

pos_zero=k;

% detectar 1ª passagem da corrente por 5% de Ip
k=pos_zero;

if positivo==1
    while (itotal(k)>-0.05*ip_abs)
        k=k+1;
    end

elseif positivo==0
    while (itotal(k)<0.05*ip_abs)
        k=k+1;
    end
end

pos_sobe=k;

% detectar pico de corrente
k=pos_sobe;

if positivo==1
    while (itotal(k)>i_min)
        k=k+1;
    end

elseif positivo==0
    while (itotal(k)<i_max)
        k=k+1;
    end
end

pos_pico=k;

% detectar 2ª passagem da corrente por 5% de Ip
k=pos_pico;

if positivo==1
    while (itotal(k)<-0.05*ip_abs)
        k=k+1;
    end

elseif positivo==0
    while (itotal(k)>0.05*ip_abs)
        k=k+1;
    end
end

pos_desce=k;

```

```

% tempo desde o zero da tensão até a corrente atingir 5% de Ip
t1=t(pos_sobe)-t(pos_zero);

% tempo desde o zero da tensão até a corrente atingir o pico
t2=t(pos_pico)-t(pos_zero);

% tempo desde o zero da tensão até a corrente cair para 5% de Ip
t3=t(pos_desce)-t(pos_zero);

% ângulos em graus
ang1=t1*360/(20e-3)      % <= 60°
ang2=t2*360/(20e-3)      % <= 65°
ang3=t3*360/(20e-3)      % >= 90°

% espectro harmónico da corrente de 0 a 2000 Hz
espectro=zeros(1,41);

n=1;

for k=1:5:201
    espectro_rms(n)=i(k);
    n=n+1;
end

% figuras
hFig1 = figure(1);
set(hFig1, 'Position', [200 200 600 330])    % x y largura altura

figure(1)
plot(t,utotal,'r-',t,itotal*1000,'b-')
axis([0 max(t) -600 600]);
grid;
text(t(pos_sobe),-
25,[num2str(ang1),'°'],'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignme
nt','top');
text(t(pos_pico),-
100,[num2str(ang2),'°'],'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignm
ent','top');
text(t(pos_desce),-
25,[num2str(ang3),'°'],'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignme
nt','top');
legend('u','i*1000')
xlabel('t (s)');
ylabel('u (V) / i*1000 (A)');

hFig2 = figure(2);
set(hFig2, 'Position', [200 200 600 330])    % x y largura altura

bar(0:40,espectro_rms,'r');
axis([0 40 0 0.15]);
title('Espectro harmónico da corrente');
xlabel('Ordem da Harmónica, {\itn}');
ylabel('Valor eficaz da corrente (A)');
grid;

```