

UNIVERSIDADE DO ALGARVE
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA

PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS
DE BAIXA TENSÃO

André Ponte Silva

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Elétrica e Eletrónica
Especialização em Sistemas de Energia e Controlo

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor José Manuel Guerreiro Gonçalves

e sob a co-orientação de:

Professor Doutor António João Freitas Gomes da Silva

Julho de 2015

UNIVERSIDADE DO ALGARVE
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA

PROJETO E DIMENSIONAMENTO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS
DE BAIXA TENSÃO

André Ponte Silva

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Elétrica e Eletrónica
Especialização em Sistemas de Energia e Controlo

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor José Manuel Guerreiro Gonçalves

e sob a co-orientação de:

Professor Doutor António João Freitas Gomes da Silva

Julho de 2015

Projeto e Dimensionamento de Instalações Elétricas de Baixa Tensão

© André Ponte Silva

Aviso: A Universidade do Algarve tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicitar este trabalho através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, de o divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Declaração de Autoria de Trabalho

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

Assinatura:

(André Ponte Silva)

AGRADECIMENTOS

Só foi possível realizar este projeto graças à colaboração e contributo de várias pessoas, às quais gostaria de exprimir os meus mais sinceros agradecimentos:

-Aos meus pais, José Silva e Délia Ponte pela forma como me apoiaram na conclusão de mais uma etapa da minha formação.

-À minha irmã, Andreia Silva que sempre me apoiou e ajudou no meu percurso escolar.

-A todos os meus colegas que me acompanharam ao longo do meu percurso escolar, em especial ao Mestre Pedro Alcaria, Adriano Fernandes e Mestre Francisco Lima.

-Ao Instituto Superior de Engenharia onde tenho o orgulho de ter estudado.

-Ao Professor Doutor António João Freitas Gomes da Silva, co-orientador deste trabalho, pela disponibilidade e apoio prestado que permitiu a sua realização.

Muito especialmente, desejo agradecer ao meu orientador Professor Doutor José Manuel Guerreiro Gonçalves, pela sua orientação, disponibilidade e atenção dispensadas.

RESUMO

O presente projeto insere-se no âmbito da obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica e Eletrónica na Universidade do Algarve elaborado sob a orientação do Professor Doutor José Manuel Guerreiro Gonçalves, e a co-orientação do Professor Doutor António João Freitas Gomes da Silva.

Considerando que uma grande parte dos trabalhos em eletrotecnia são realizados no âmbito do projeto, execução e exploração de Instalações Elétricas de Baixa Tensão, estudaram-se e analisaram-se os cálculos, estrutura e legislação afetos ao Projeto e Dimensionamento de Instalações Elétricas de Baixa Tensão.

Realizou-se uma ferramenta de cálculo de forma a aumentar a produtividade e qualidade do produto final considerando a legislação, normalização, segurança e custos económicos.

Foi também objetivo do presente trabalho apresentar a estrutura típica dos Projetos de Instalações Elétricas, e analisar alguns parâmetros do dimensionamento dessas Instalações, tais como as perturbações harmónicas em Instalações Elétricas ou a escolha criteriosa do material da Alma Condutora.

Palavras-chave: Ferramenta de cálculo, projeto, dimensionamento, perturbações harmónicas, memória descritiva, legislação e normalização.

ABSTRACT

This project arose within the course of the degree of Master in Electrical Engineering and Electronics at University of Algarve and was prepared under the supervision of Professor José Manuel Guerreiro Gonçalves and the co-supervision of Professor António João Freitas Gomes da Silva.

Since most of the works in electrotechnical are carried out under the design, implementation and operation of low voltage electrical facilities, it was studied and analyzed the calculations, the structure and the legislation related to Designing and Sizing Low Voltage electrical Installations.

Was performed a calculation tool to increase the productivity and quality of the final product according to laws, standardization, security and economic costs.

It was also objective of this study to present the typical Electrical Installation Design structure and analyze some electrical installations dimensioning parameters, such as harmonic disturbances in electrical installations or the careful choice of the Soul Conductive material.

Keywords: Calculation Tool, designing, sizing, harmonic disturbances, description, legislation and normalization.

ÍNDICE

1.	Introdução	1
1.1	Motivação e enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estado da arte	3
1.4	Estrutura da dissertação.....	4
2.	Regras técnicas, normalização e regulamentação	5
2.1	Enquadramento histórico.....	5
2.2	Regras técnicas de instalações elétricas de baixa tensão.....	5
2.3	Decreto-lei nº 517/80.....	6
2.4	Regulamento técnico de segurança contra incêndios em edifícios	6
2.5	Outra regulamentação.....	7
2.6	Normalização.....	7
3.	Constituição dos projetos de instalações elétricas de baixa tensão.....	11
3.1	Generalidades	11
3.2	Peças escritas.....	11
3.2.1	Lista de documentos.....	11
3.2.2	Termo de responsabilidade	12
3.2.3	Ficha eletrotécnica	12
3.2.4	Ficha de identificação do projeto da instalação elétrica	12
3.2.5	Planta de localização	13
3.2.6	Memória descritiva e justificativa.....	13
3.3	Peças desenhadas.....	14
3.3.1	Planta de localização	14
3.3.2	Plantas com traçado e constituição das instalações	14
4.	Dimensionamento e cálculos	18
4.1	Generalidades	18
4.2	Parâmetros e características dos condutores	18
4.2.1	Resistividade das almas condutoras	18
4.2.2	Resistências lineares dos condutores	19
4.3	Seleção das resistividades e reatâncias lineares	22

4.4	Características das fontes de alimentação	24
4.4.1	Rede de distribuição de baixa tensão.....	24
4.4.2	Rede de distribuição de média tensão.....	25
4.4.3	Geradores.....	26
4.5	Fator de tensão (C).....	27
4.6	Características dos dispositivos de corte e de proteção	27
4.6.1	Generalidades	27
4.6.2	Disjuntores.....	28
4.6.3	Fusíveis.....	31
4.6.4	Interruptores.....	32
4.7	Proteção contra sobrecargas.....	32
4.7.1	Corrente de serviço (I_B)	32
4.7.2	Corrente estipulada do dispositivo de proteção (I_n).....	33
4.7.3	Corrente admissível numa canalização (I_z).....	33
4.7.4	Corrente convencional de funcionamento do dispositivo de proteção	34
4.8	Determinação do poder de corte dos dispositivos de proteção	34
4.8.1	Correntes de curto-circuito	34
4.9	Proteção contra contactos indirectos	37
4.9.1	Proteção contra contactos indirectos em esquema TT	39
4.9.2	Proteção contra contactos indirectos em esquema TN.....	40
4.9.3	Proteção contra contactos indirectos em esquema IT.....	41
4.10	Cálculo da corrente de defeito.....	42
4.11	Verificação das características térmicas dos condutores.....	44
4.11.1	Cálculo das correntes de curto-circuito mínimas.....	45
4.12	Quedas de tensão	46
5.	Análise de alguns parâmetros do dimensionamento de instalações elétricas	49
5.1	Determinação da secção económica	49
5.1.1	Cálculo da secção económica	50
5.2	Escolha do material da alma condutora	52
5.3	Perturbações harmónicas em instalações elétricas.....	54
5.3.1	Introdução.....	54
5.3.2	Definição.....	54
5.3.3	Análise e definição dos indicadores quantitativos das harmónicas	55
5.3.4	Origem e classificação das harmónicas	60

5.3.5	Cargas não lineares típicas	60
5.3.6	Medição de harmónicas em instalações elétricas	69
5.3.7	Efeitos das harmónicas nas instalações elétricas	70
5.3.8	Análise de cargas não lineares típicas	77
5.3.9	Soluções para atenuar as harmónicas	96
6.	Memória descritiva	99
6.1	Generalidades	99
6.2	Introdução.....	99
6.3	Normas e regulamentos	100
6.4	Descrição e constituição do imóvel.....	100
6.5	Classificação quanto às influências externas.....	101
6.6	Entrega de energia elétrica	101
6.7	Contagem de energia elétrica	102
6.8	Distribuição de energia elétrica.....	103
6.9	Cortes de energia elétrica	103
6.10	Quadros elétricos	103
6.11	Compensação do fator de potência	103
6.12	Instalações de tomadas e alimentação de equipamentos	104
6.12.1	Tomadas	104
6.12.2	Tomadas do tipo industrial.....	104
6.12.3	Circuitos de tomadas e alimentação de equipamentos.....	105
6.13	Canalizações	105
6.13.1	Caixas e calhas de pavimento	105
6.14	UPS's	105
6.15	Iluminação de segurança.....	106
6.15.1	Circuitos de iluminação de segurança.....	107
6.16	Instalações de iluminação	107
6.16.1	Luminárias	107
6.16.2	Circuitos de iluminação	108
6.17	Proteção contra contactos indirectos	108
6.17.1	Proteção contra contactos indirectos das instalações especiais	109
6.17.2	Instalações e locais especiais	109
6.18	Proteção contra contactos directos	109
6.19	Proteção contra sobretensões	110

6.20	Rede de terras	110
6.21	Sistema de captação contra descargas atmosféricas	110
6.22	Ensaios.....	110
6.23	Subestações	111
7.	Ferramenta de apoio à execução de projetos elétricos de baixa tensão	114
7.1	Generalidades.....	114
7.2	Transformadores	114
7.3	Geradores	115
7.4	Características dos condutores	116
7.5	Quadros elétricos e cargas.....	116
7.6	Canalizações e proteções	117
7.7	Base de dados.....	118
8.	Exemplo prático.....	120
8.1	Generalidades.....	120
8.2	Exemplo de cálculo.....	120
8.2.1	Exemplo de cálculo - Transformadores	121
8.2.2	Exemplo de cálculo - Quadros elétricos e cargas	121
8.2.3	Exemplo de cálculo - Canalizações e proteções	122
9.	Observações, conclusões e sugestões para trabalhos futuros	123
9.1	Análise do trabalho efetuado.....	123
9.2	Direções de trabalho futuro.....	124
10.	Bibliografia	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.1 – Relação entre a secção e custo de um condutor.....	50
Figura 5.2 – Diagrama cartesiano de tensões 1ª e 3ª harmónicas ($\alpha_1 = 0$ e $\alpha_3 = -\pi$).	63
Figura 5.3 – Diagrama cartesiano de tensões 1ª e 3ª harmónicas ($\alpha_1 = 0$ e $\alpha_3 = 0$).....	64
Figura 5.4 – Diagrama cartesiano de tensão e correntes harmónicas ($\alpha_1 = 0$ e $\alpha_3 = -\pi$).	65
Figura 5.5 – Diagrama cartesiano de tensão e correntes harmónicas ($\alpha_1 = 0$ e $\alpha_3 = 0$).....	65
Figura 5.6 – Paralelepípedo de potências considerando a potência deformante D_t	77
Figura 5.7 – Circuito de retificação de meia onda.	78
Figura 5.8 – Diagrama das tensões sinusoidais rectificadas e corrente i – retificador de meia onda.....	78
Figura 5.9 – Harmónicas de tensão sinusoidal rectificada – retificador de meia onda.	80
Figura 5.10 – Harmónicas de corrente rectificada – retificador de meia onda.	80
Figura 5.11 – Potência instantânea no circuito RL série – retificador de meia onda.....	83
Figura 5.12 – Variação da resistência, da reatância e de impedância – retificador de meia onda.....	84
Figura 5.13 – Corrente rectificada no troço de circuito RL série para diversos valores de $\cos\varphi_1$ – retificador de meia onda.....	85
Figura 5.14 – Variação dos diversos factores de potência em função de $\cos\varphi_1$ – retificador de meia onda.	87
Figura 5.15 – Circuito de retificação de onda completa (ponte de Graetz).	88
Figura 5.16 – Harmónicas de tensão sinusoidal rectificada – retificador de onda completa....	89
Figura 5.17 – Harmónicas de corrente rectificada – retificador de onda completa.	89
Figura 5.18 – Potência instantânea no circuito RL série – retificador de onda completa.....	92
Figura 5.19 – Corrente rectificada – retificador de onda completa	93
Figura 5.20 – Variação dos diversos factores de potência em função de $\cos\varphi_1$ – retificador de onda completa.	93
Figura 8.1 – Circuito simulado na ferramenta de cálculo (S_{CCrede} – potência de c.c. a montante da rede e u_{cc} – tensão de c.c. em percentagem).....	120

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Resistividade das almas condutoras (Cu e Al).....	18
Tabela 4.2 – Resistividade das almas condutoras em função da temperatura.	20
Tabela 4.3 – Reatância linear dos condutores (λ).	22
Tabela 4.4 – Escolha das resistividades e reatâncias lineares das canalizações.....	23
Tabela 4.5 – Fator de tensão C	27
Tabela 4.6 – Correntes máximas instantâneas de funcionamento dos disjuntores.....	31
Tabela 4.7 – Valor das impedâncias para o cálculo de correntes máximas de curto-circuito.....	37
Tabela 4.8 – Tempos máximos de corte para o esquema TN.....	41
Tabela 4.9 – Tempos máximos.....	42
Tabela 4.10 – Valores das impedâncias para o cálculo de correntes máximas de defeito.	43
Tabela 4.11 – Fator K	45
Tabela 4.12 – Valores das impedâncias para o cálculo de correntes mínimas de c.c.....	46
Tabela 4.13 – Quedas de tensão máximas admissíveis.	47
Tabela 5.1 – Dados comparativos entre retificação de meia onda e de onda completa.	94
Tabela 5.2 – Dados comparativos entre retificação de meia onda e de onda completa.	95
Tabela 5.3 – Dados comparativos entre retificação de meia onda e de onda completa.	95
Tabela 6.1 – Classificação dos estabelecimentos em função da lotação.	106
Tabela 8.1 – Tabela de dimensionamento de transformadores.....	121
Tabela 8.2 – Tabela de dimensionamento de quadros eléctricos e cargas.....	121
Tabela 8.3 – Tabela de dimensionamento de canalizações e proteções.	122

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Lista de Abreviaturas e Acrónimos

ac	Corrente alternada
ALPI	Empresa que exerce a sua actividade em torno do desenvolvimento de software na área da engenharia electrotécnica
BT	Baixa Tensão
c.c.	Curto-circuito
CEE	Comunidade Económica Europeia
CEI	Comissão Eletrotécnica Internacional
CENELEC	Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica
CERTIEL	Associação Certificadora de Instalações Eléctricas
DGE	Direcção Geral de Energia
Disj.	Disjuntor
DIN	Instituto Alemão de Normalização
DL	Decreto-Lei
EDP	Energias (Eletricidade) de Portugal
EN	Norma Europeia
Fus.	Fusível
HD	Documento Harmonizado do CENELEC
HD 384.4.41	Instalações Eléctricas de edifícios, 4ª parte, Protecção para garantir a segurança, Secção 41, Protecção contra os choques eléctricos
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional (ou CEI)
IK	Índice de protecção contra os impactos mecânicos externos
IP	Índice protecção contra a penetração de corpos sólidos
ISO	International Organization for Standardization
IT	Esquema das ligações à terra, em que todas as partes ativas estão isoladas da terra ou que um ponto destas está ligado à terra por meio de uma impedância, sendo as massas da instalação eléctrica também ligadas à terra

LMSA	Empresa de Engenharia que exerce a sua actividade em torno dos edifícios e das infra-estruturas para grandes empreendimentos.
Máx (máx)	Máximo
Mín (mín)	Mínimo
MT	Média Tensão
N	Condutor de Neutro
NF	Norma Francesa
P3	Empresa de engenharia que exerce actividade em torno dos projetos de especialidades
PE	Condutor de Proteção
PEN	Condutor ligado à terra e que tem, simultaneamente, as funções de condutor de proteção e de condutor neutro.
<i>ph</i>	Condutor de fase
PT	Posto de Transformação
pu	Por unidade
PVC	Policloreto de Vinilo
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
RMS (rms)	Valor eficaz
RJUE	Regime Jurídico da Urbanização e Edificação
RSICEE	Regulamento de Segurança de Instalações Colectivas de Edifícios e Entradas
RSIUEE	Regulamento de Segurança de Instalações de Utilização de Energia Eléctrica
RSSPTS	Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação e de Seccionamento
RTIEBT	Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão
RTSCIE	Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
TDH	Taxa de Distorção Harmónica
TDHI	Taxa de Distorção Harmónica da Corrente
TDHP	Taxa de Distorção Harmónica da Potência
TDHU	Taxa de Distorção Harmónica da Tensão
THD	Taxa de Distorção Harmónica Total

TN	Esquema das ligações à terra com um ponto ligado diretamente à terra, sendo as massas da instalação ligadas a esse ponto por meio de condutores de proteção
TN-C	Esquema das ligações à terra com um ponto ligado diretamente à terra, sendo as massas da instalação ligadas a esse ponto por meio de condutores de proteção, onde as funções de neutro e de proteção estão combinadas num único condutor na totalidade do esquema
TN-S	Esquema das ligações à terra com um ponto ligado diretamente à terra, sendo as massas da instalação ligadas a esse ponto por meio de condutores de proteção, onde as funções de neutro e de proteção estão separadas em dois condutores
TRF	Tensão reduzida funcional
TRP	Tensões reduzida de proteção
TRS	Tensão reduzida de segurança
TT	Esquema das ligações à terra com um ponto da alimentação ligado diretamente à terra, sendo as massas da instalação eléctrica ligadas a eléctrodos de terra eletricamente distintos do eléctrodo de terra da alimentação
UPS	Unidade Ininterrupta de Alimentação
UTE	Comissão Electrotécnica Internacional (ou CEI)
VDE	Associação dos Eletrotécnicos Alemães
XPLE	Polietileno Reticulado (PR EPR)

1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação foi elaborada no âmbito do Mestrado em Engenharia Elétrica e Eletrônica, ramo de Sistemas de Energia e Controle. Neste ponto serão enunciados o enquadramento e motivação, os objetivos e a estrutura do documento.

1.1 MOTIVAÇÃO E ENQUADRAMENTO

Durante a minha experiência profissional na P3 Projetos de Engenharia S.A. e na LMSA Engenharia de Edifícios, enquanto projetista de Instalações Elétricas de Baixa Tensão, fui confrontado com uma enorme quantidade de informação, em fontes relativamente dispersas. Entre regulamentos, normas nacionais e internacionais, deparei-me com uma enorme complexidade para projetar Instalações de Baixa Tensão, cumprindo todas as regras técnicas e normalizações europeias. Após consulta de inúmeros projetos realizados por gabinetes de renome, verifiquei que os critérios de cálculo eram bastante dispares, não cumprindo, por vezes, a normalização europeia, simplificados e até errados, podendo levar a encargos onerosos para o dono de obra, tanto a curto como a longo prazo, ou pôr em causa a segurança de pessoas e bens.

Em relação às peças escritas de um projeto verifiquei que dadas as dimensões das Regras Técnicas de Baixa Tensão (RTIEBT) e a sua complexa mas eficiente estrutura, não esquecendo outros regulamentos como o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RTSCIE) é bastante moroso efetuar uma memória descritiva adequada à instalação a projetar, verificando-se que, muitas vezes, os projetistas optam por realizar memórias adequadas para a generalidade de todos os edifícios, com pequenas adaptações, o que resulta num documento vasto, com informações vagas e desnecessárias para a instalação em questão, por vezes com grandes omissões que são esclarecidas geralmente num capítulo referente às omissões do projeto onde as mesmas são remetidas para as RTIEBT. Estas razões fazem com que muitas vezes os instaladores as considerem desinteressantes e ignorem o documento em questão.

Estes erros e omissões muitas vezes não são originados não por falta de conhecimento, nem sequer de empenho por parte dos projetistas, resultam de pressões a que costumam estar

sujeitos aquando da elaboração dos projetos, pois existe geralmente grande urgência em concluir os projetos para que a obra possa ser licenciada ou executada.

Verifiquei ainda que existiam algumas fases de projeto bastante metódicas, então surgiu o interesse em criar uma ferramenta de apoio ao projetista, de maneira a facilitar o trabalho do mesmo e aumentar o seu desempenho.

Surgiu também interesse por analisar alguns parâmetros do dimensionamento de Instalações Elétricas que geralmente não são tidos em conta pelos projetistas, tais como a determinação da secção económica dos condutores, a escolha criteriosa do material da alma dos condutores e as perturbações harmónicas em Instalações Elétricas.

1.2 OBJETIVOS

O intuito primordial desta dissertação é o desenvolvimento de uma aplicação de cálculo destinada ao apoio de projetistas de Instalações Elétricas com as seguintes aptidões:

Cálculo e dimensionamento das secções dos condutores e suas respetivas proteções, tendo em conta:

- O regime de neutro aplicado;
- A diversidade de fabricantes de aparelhagem e equipamentos existente no mercado;
- Toda a rede a montante e a jusante do condutor em questão;
- O fator de potência e a possível distorção harmónica;
- As correntes de serviço;
- As correntes de curto-circuito máximas e mínimas;
- O comprimento dos condutores;
- A secção mais económica;
- As quedas de tensão;
- Os dispositivos de proteção a montante e a jusante;
- A seletividade das instalações;
- As características térmicas dos condutores;
- Os métodos de referência;
- Os fatores de correção.

Esta dissertação também terá como objetivo abordar alguns parâmetros relacionados com o projeto e dimensionamento das Instalações Elétricas, tais como a seleção criteriosa dos materiais das almas condutoras e a problemática relacionada com a distorção harmónica nas instalações.

1.3 ESTADO DA ARTE

Existem atualmente no mercado vários softwares criados por fabricantes como a Schneider, a Siemens ou a ABB (Asea Brown Boveri), capacitadas para efetuar dimensionamentos eficazes, no entanto estes são inteiramente direcionados para fidelizar o projetista a esses mesmos fabricantes, limitando todo o projeto, tanto economicamente como qualitativamente. Os softwares, facultados pelas empresas, não apoiam os projetistas na memória descritiva do projeto, apresentando apenas as características dos seus equipamentos.

Um outro fornecedor de software de dimensionamento de Instalações Elétricas é a CYPE (Empresa que desenvolve software para arquitetura, engenharia e construção), através do módulo Cypelect, esta ferramenta é bastante completa apoiando o projetista em todas as peças escritas e desenhadas, aumentando muito a produtividade do projetista, garantido trabalho de qualidade, no entanto têm algumas limitações nomeadamente nos sistemas de terra a utilizar, e na normalização europeia cumprida.

Caneco é uma outra poderosa ferramenta desenvolvida pela ALPI (Empresa especialista em programas e serviços de engenharia eletrotécnica), capacitada para efetuar cálculos, esquemas unifilares e orçamentos de Instalações Elétricas, fazendo também estudos económicos em que se comparam os custos de utilização de almas de cobre com as de alumínio nos condutores. Esta ferramenta cumpre toda a normalização internacional e europeia, no entanto não tem em consideração as RTIEBT portuguesas.

Todos estes softwares têm bastantes limitações no que diz respeito à apresentação das memórias de cálculo, não sendo apresentadas, ou sendo apenas de forma leviana e simplificada, deixando, por vezes, o projetista no desconhecimento dos métodos utilizados, sendo este, no entanto, o responsável pela subscrição e responsabilidade do projeto.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este mesmo capítulo introdutório tem como finalidade introduzir o trabalho desenvolvido, enquadrando-o, apresentando os objetivos e o estado de arte atual.

No segundo capítulo são apresentadas as regras técnicas e normalizações a que os projetos de Instalações Elétricas devem respeitar.

No terceiro capítulo é estudada a estrutura e constituição dos projetos de Instalações Elétricas de Baixa Tensão.

No quarto capítulo são descritos os cálculos de dimensionamento a executar pela ferramenta de cálculo.

No quinto capítulo será feita uma análise teórica de alguns parâmetros do dimensionamento, sendo efetuada uma abordagem em relação à seleção económica de condutores e apresentados alguns tópicos problemáticos da poluição harmónica nas Instalações Elétricas.

No sexto capítulo são apresentadas as estruturas das memórias descritivas, tendo em conta as tipologias das instalações a projetar.

No sétimo capítulo é apresentado um exemplo de dimensionamento.

No oitavo e último capítulo são feitas as conclusões e desenvolvimentos a realizar no seguimento deste trabalho.

2. REGRAS TÉCNICAS, NORMALIZAÇÃO E REGULAMENTAÇÃO

2.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

No final do século XIX, na implementação das primeiras Instalações Elétricas de BT, ocorreram desde logo as primeiras electrocuções e incêndios provocados pelas mesmas. Por estas razões as Instalações Elétricas foram consideradas perigosas, surgiu assim a necessidade técnica de controlar os perigos das instalações. Surgiram poucos anos depois as primeiras legislações, regulamentações e normalizações sobre o tema das quais se pode destacar, a título de exemplo, o Decreto-Lei n.º 26/852, de 30 de julho de 1936, que publica o Regulamento de Licenças para Instalações Elétricas.

Em 1974 surge o conhecido Decreto-Lei n.º 740/74 que aprova os Regulamentos de Segurança de Instalações de Utilização de Energia Elétrica e de Instalações Coletivas de Edifícios e Entradas (RSIUEE e RSICEE) [2].

2.2 REGRAS TÉCNICAS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO

Após 30 anos de vigência do Regulamento de Segurança de Instalações de Utilização de Energia Elétrica de Edifícios e Entradas, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 740/74, surgiu o Decreto-Lei 226/2005 que estabeleceu os procedimentos de aprovação das Regras Técnicas das Instalações Elétricas de Baixa Tensão (RTIEBT) [3] [4].

As RTIEBT foram criadas com o intuito de atualizar a regulamentação de acordo com as evoluções técnicas ocorridas, mas também para se adaptarem à realidade de Portugal como membro da União Europeia, e assim permitir a livre circulação de equipamentos elétricos de Baixa Tensão (BT), como também para proporcionar consensos europeus a nível de regras de instalação que facilitem a circulação de técnicos [3].

O DL 226/2005 sugere que as RTIEBT se aproximem o mais possível dos documentos de harmonização da série HD 384 do Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica (CENELEC) ou, na sua falta, das publicações da série 364 da Comissão Eletrotécnica Internacional (CEI) [3].

No seguimento do DL 226/2005, surge a Portaria nº 949-A/2006 [5], de 11 de setembro, que aprova e apresenta as RTIEBT.

As RTIEBT são compostas por oito partes e destinam-se a definir as regras de instalação e de segurança das Instalações Elétricas de energia elétrica por forma a garantir, satisfatoriamente, o seu funcionamento e a segurança tendo em conta a utilização prevista, sendo aplicáveis à generalidade de edifícios e recintos providos de Instalações Elétricas com tensão nominal não superior a 1000 V Comissão Eletrotécnica Internacional (CEI) [1].

2.3 DECRETO-LEI Nº 517/80

O Decreto-Lei n.º 517/80 estabelece as normas a observar na elaboração de projetos das Instalações Elétricas de serviço particular [6].

Este Decreto-Lei define a constituição de projetos de licenciamento das instalações, enunciando, no artigo 4º, a constituição de projetos de licenciamento de Instalações Elétricas no que se refere a peças escritas e peças desenhadas, assim com as regras a ter em conta na apresentação desses mesmos elementos.

2.4 REGULAMENTO TÉCNICO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIOS EM EDIFÍCIOS

A Portaria nº 1532/2008 [7] apresenta o Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndios em Edifícios (RTSCIE), assumindo uma importância fundamental no que se refere aos projetos e dimensionamento de Instalações Elétricas. Esta portaria é aprovada pelo Decreto-Lei n.º 220/2008 [6].

O RTSCIE apresenta diversas regras que devem ser seguidas no âmbito da segurança contra incêndios em edifícios, incluindo regras que devem ser tomadas em conta no projeto de Instalações Elétricas. Por vezes, este documento apresenta algumas sobreposições às próprias RTIEBT. Nestes casos o RTSCIE deve prevalecer por ter sido aprovado por um Decreto-Lei mais atual.

2.5 OUTRA REGULAMENTAÇÃO

O projeto de Instalações Elétricas deve ter ainda em conta outras regulamentações e legislações gerais, tais como o Regime Jurídico da Urbanização e Edificação (RJUE) [8], ou o Regulamento Geral do Ruído [9], assim como outras normas específicas relacionadas com os edifícios a projetar, das quais se realçam as relacionadas com os estabelecimentos de restauração e bebidas [10], as relacionadas com os estabelecimentos hoteleiros [11], ou as relacionadas com o armazenamento de combustível e emissão de gases no caso dos grupos geradores.

2.6 NORMALIZAÇÃO

As RTIEBT são responsáveis por garantir uma base legislativa em relação às regras de instalação e de segurança das Instalações Elétricas, no entanto as mesmas não definem boa parte dos métodos de cálculo a serem aplicados pelos projetistas.

Deste modo entramos num vazio legal, pois parece ser deixado ao critério do projetista os métodos de cálculo e respetivas simplificações técnicas.

É necessário então considerar fatores de segurança e de simplificação, considerando os casos mais desfavoráveis dentro dos limites razoáveis.

Um dos objetivos deste trabalho é apresentar e analisar os princípios de cálculo e dimensionamento de Instalações Elétricas de BT.

Utilizando conhecimentos puramente teóricos, poderemos realizar o cálculo de uma grandeza elétrica de inúmeras formas, que nos conduzem a resultados mais ou menos aproximados. Em regra, a consideração de um maior número de variáveis permite obter resultados mais aproximados. No entanto, é muitas vezes complicado conhecer todas as variáveis necessárias e as condições de implementação exatas dos equipamentos e materiais em causa.

Apesar de ser possível obter resultados bastante aproximados da realidade, utilizando apenas conceitos teóricos, será necessário ainda definir margens de segurança para se poder utilizar esses valores para fins destinados à engenharia.

Considerando que em engenharia é necessário considerar margens de segurança e que existem várias variáveis desconhecidas, facilmente se conclui que é prudente utilizar

cálculos relativamente simplificados, desde que estes considerem os casos mais desfavoráveis das variáveis desconhecidas e margens de segurança.

Considerando esta última afirmação, verifica-se a necessidade de definir qual o nível de simplificação aceitável, quais os valores variáveis de difícil obtenção, e quais as margens de segurança. É neste contexto que surge a necessidade de utilizar a normalização no cálculo e dimensionamento de Instalações Elétricas.

A Normalização pode ser definida como a atividade destinada a estabelecer, face a problemas reais ou potenciais, disposições para a utilização comum e repetida, tendo em vista a obtenção do grau ótimo de ordem, num determinado contexto. Consiste, de um modo particular, na formulação, edição e implementação de normas [12].

Podendo uma norma ser definida como um documento, estabelecido por consenso e aprovado por um organismo reconhecido, que define regras, linhas de orientação ou características para atividades ou seus resultados, destinadas a utilização comum e repetida, visando atingir um grau ótimo de ordem, num dado contexto [12].

A linguagem falada e, mais tarde, a escrita, que se desenvolveram para possibilitar a comunicação entre os homens, podem ser consideradas como formas primeiras de normalização [13].

As normas deverão responder ao objetivo visado, terem um nível elevado de aceitabilidade resultante da participação plena de todas as partes interessadas no processo de normalização, serem coerentes entre elas, e permitirem simultaneamente a inovação tecnológica e a concorrência.

Assim, as normas deverão fundamentar-se na pesquisa científica de qualidade, serem atualizadas e visarem, tanto quanto possível, a eficácia [14].

A normalização evoluiu com o decorrer da história, podendo-se destacar, a título de exemplo, a adoção francesa do sistema métrico decimal com a aprovação da Lei de 1 de agosto de 1793, ou a adoção de um sistema de diâmetros e passos normalizados para elementos roscados (rosca inglesa ou rosca Whitworth), por Sir Joseph Whitworth, em 1841, no Reino Unido.

A necessidade da adoção de normas internacionais foi amplificada no decorrer das atividades de cooperação técnica militar da Segunda Guerra Mundial.

No seguimento de fazer face a estas necessidades surgiram vários organismos que desenvolvem ações em prol da Atividade Normativa.

No campo da Engenharia Eletrotécnica merecem destaque:

- A VDE (Associação dos Eletrotécnicos Alemães), primeiro organismo de normalização para o estabelecimento de normas para a construção e instalação de aparelhos elétricos, em 1893;
- A criação da IEC – Comissão Eletrotécnica Internacional (ou CEI), para o desenvolvimento da atividade normativa internacional no domínio eletrotécnico, em Londres, em 1906;
- A criação do DIN – Instituto Alemão de Normalização, em 1917;
- A criação da ISO – “International Organization for Standardization”, com sede em Genebra, para facilitar a coordenação e a unificação internacionais das normas industriais, em 1947;
- A criação do CENELEC – Comité Europeu de Normalização Eletrotécnica, em 1973.

Estas instituições têm sido responsáveis por criar um vasto conjunto de normalizações relacionadas com as Instalações Elétricas e equipamentos aplicáveis a um largo número de países, permitindo assim a existência de comércio livre e o intercâmbio de técnicos.

Como já foi referido, as RTIEBT deixam espaço para um vazio regulamentar no que diz respeito aos métodos de cálculo de várias grandezas elétricas, pelo que se considera necessário recorrer a normas guias e a recomendações internacionais reconhecidas pela CENELEC.

No que diz respeito aos cálculos para dimensionamento de Instalações Elétricas de BT, destaca-se o documento UTE C 15-105.

Este documento apresenta um guia prático para a determinação da secção de condutores, e para escolha dos seus dispositivos de proteção com exemplificação de alguns métodos práticos [15].

O guia UTE C 15-105 descreve métodos práticos que não envolvem o uso de software, que fornece:

- 2 métodos aproximados:
 - O método de composição;
 - O método convencional.
- 1 método rigoroso:
 - O método das impedâncias.

Após o lançamento do guia UTE C15-105, a UTE publicou o guia UTE C 15-500 com o objetivo de servir de base para a escrita de um software de cálculo e dimensionamento. A

UTE C 15-500 trata-se de um guia prático para a determinação da secção de condutores, e para escolha dos seus dispositivos de proteção com softwares.

O guia UTE C 15-500 é aplicável às instalações de BT em que os circuitos são constituídos por condutores isolados, por cabos ou canalizações pré-fabricadas, e define os diversos parâmetros utilizados para o cálculo das canalizações elétricas, a fim de satisfazer as regras da HD 384 [15-500] cumpridas pelas RTIEBT.

Estas regras são essencialmente as seguintes:

- Intensidades de corrente admissíveis nos condutores;
- Características dos dispositivos de proteção contra as sobrecargas;
- Verificação das características térmicas dos condutores quando ocorre um curto-circuito;
- Proteção contra os contactos indiretos;
- Limitação da queda de tensão.

As bases de dimensionamento, utilizadas no âmbito deste trabalho, têm em conta, sempre que possível, o guia UTE C 15-500 que é perfeitamente compatível no que se refere ao cálculo e dimensionamento com as RTIEBT.

3. CONSTITUIÇÃO DOS PROJETOS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO

3.1 GENERALIDADES

O objetivo deste capítulo é apresentar a constituição típica dos projetos de Instalações Elétricas de BT de acordo com a regulamentação, e em concordância com a estrutura geralmente apresentada pelos projetistas.

Um projeto de Instalações Elétricas de BT é geralmente constituído por peças escritas e peças desenhadas, e tem como objetivo descrever e prestar todos os esclarecimentos necessários para a execução e exploração das instalações projetadas.

3.2 PEÇAS ESCRITAS

As Peças Escritas são geralmente constituídas por:

- Lista de Documentos;
- Ficha de Identificação do Projeto da Instalação Elétrica;
- Ficha Eletrotécnica;
- Mapa de Localização;
- Termo de Responsabilidade;
- Memória Descritiva e Justificativa;
- Condições Técnicas.

3.2.1 LISTA DE DOCUMENTOS

Na lista de documentos é apresentado um índice das peças escritas e desenhadas. Trata-se de um documento fundamental para a consulta de um Projeto de Instalações Elétricas.

É, por vários motivos, frequente existirem revisões aos documentos após a primeira entrega do projeto. Usualmente considera-se que a primeira entrega é a revisão “00”, como

tal é essencial que a lista de documentos possua um campo onde se possa indicar as revisões dos documentos e as datas a que ocorreram essas revisões.

3.2.2 TERMO DE RESPONSABILIDADE

Segundo o artigo 12.º do Capítulo IV, Decreto-Lei n.º 517/80 de 31 de outubro:

“Os projetos deverão ser acompanhados de um termo de responsabilidade pela sua elaboração, redigido de acordo com o anexo III.1, assinado por um técnico devidamente inscrito na Direcção-Geral de Energia” [16].

O termo de responsabilidade exige que o autor do projeto declare que nele se observaram as disposições regulamentares em vigor, bem como outra legislação aplicável.

Segundo a declaração exigida, a responsabilidade do autor do projeto termina com a aprovação do projeto ou dois anos após a sua entrega ao proprietário da instalação, caso o projeto não seja submetido a aprovação.

3.2.3 FICHA ELETROTÉCNICA

A Ficha Eletrotécnica é definida pelo anexo II.2 do DL 517/80 [16]. Este é um documento que tem a função de resumir, de forma clara e objetiva, as principais características da instalação a realizar, tais como a morada do imóvel, a identificação do requerente, a identificação do projetista, a constituição do imóvel, a potência e as principais cargas a alimentar, e as informações acerca de instalações existentes (no caso de se tratar de uma remodelação).

É necessário apresentar uma Ficha Eletrotécnica por cada ramal, chegada ou entrada.

O distribuidor público aprova a alimentação das instalações através deste documento.

3.2.4 FICHA DE IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO DA INSTALAÇÃO ELÉTRICA

A Ficha de Identificação é definida pelo anexo II.1 do DL 517/80 [16]. Este é um documento que tem a função de declarar a localização e morada do imóvel em que será realizada a instalação elétrica, de identificar o requerente e o técnico responsável pela elaboração do projeto. Neste documento também são dadas informações acerca da tramitação dos processos.

3.2.5 PLANTA DE LOCALIZAÇÃO

Deverá também ser apresentada uma planta de localização em escala não inferior a 1:2500, contendo os elementos de referência e orientação necessários à fácil localização das instalações a que se refere o projeto [16].

3.2.6 MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA

A Memória Descritiva e Justificativa do projeto deverá conter todos os elementos e esclarecimentos necessários para darem uma ideia perfeita da natureza, importância, função e características das instalações [16].

Os pontos expostos adiante apresentam os elementos escritos a apresentar nos projetos de Instalações Elétricas de BT, de acordo com o DL 517/80:

- Conceção das instalações;
- Indicação das características técnicas dos materiais a empregar ou das respetivas normas;
- Indicação das características dos aparelhos de utilização previstos que permitam dimensionar os circuitos em que estão inseridos;
- Dimensionamento dos circuitos e das respetivas proteções contra sobreintensidades, com os cálculos eventualmente necessários para o efeito;
- Dimensionamento das instalações coletivas e entradas, indicação das proteções contra sobreintensidades e respetiva justificação;
- Dimensionamento das Instalações Elétricas para alimentar os elevadores;
- Indicação do sistema adotado para proteção das pessoas, e descrição pormenorizada da execução dos circuitos de proteção e dos respetivos elétrodos de terra;
- Quando necessário, elaborar a descrição de tipos e características dos geradores de energia elétrica, transformadores de potência, conversores, retificadores, aparelhagem de corte e de proteção, bem como das caldeiras, turbinas e outras máquinas motoras.

Considerando o número e a complexidade de cálculos necessários para efetuar o dimensionamento dos circuitos existentes num projeto, considera-se que é impraticável apresentá-los de forma exaustiva. Considera-se, na presente dissertação, que a forma mais expedita de apresentar os cálculos é através de uma tabela onde possam ser consultadas todas

as principais grandezas elétricas, proteções, secções dos condutores e outras características. Considera-se ainda que os cálculos poderão ser expressos através de uma memória de cálculo, em que se apresentem, de forma genérica, os cálculos efetuados em tabelas.

No capítulo 4 são apresentados e justificados os cálculos inerentes ao dimensionamento de Instalações Elétricas de BT.

No capítulo 6 será apresentada uma delineação típica de uma memória descritiva de acordo com os elementos atrás mencionados.

3.3 PEÇAS DESENHADAS

O DL 517/80 apresenta, no artigo n.º 3, as peças desenhadas que o projeto deverá conter para efeitos de licenciamento [16].

Em projetos de execução poderá fazer sentido acrescentar um maior nível de detalhe e de pormenorização das peças desenhadas, para além do citado nesta dissertação.

Apresentam-se nos subcapítulos seguintes uma sequência típica do conteúdo e constituição das peças desenhadas a apresentar num projeto de Instalações Elétricas.

3.3.1 PLANTA DE LOCALIZAÇÃO

De acordo com o DL 517/80, deverá também ser apresentada uma planta de localização constituída por uma planta geral dos recintos servidos pelas Instalações Elétricas, em escala não inferior a 1:2500, contendo os elementos de referência e orientação necessários à fácil localização das instalações a que se refere o projeto.

3.3.2 PLANTAS COM TRAÇADO E CONSTITUIÇÃO DAS INSTALAÇÕES

Devem ser apresentados, de acordo com o DL 517/80, plantas com o traçado e constituição das canalizações, e com a indicação dos elementos indispensáveis à conveniente apreciação do seu dimensionamento [16]. Também devem, ainda segundo o DL 517/80, ser apresentados alçados, cortes ou outros desenhos, complementares das plantas referidas, com o pormenor suficiente para o perfeito conhecimento das instalações projetadas [16].

Geralmente são apresentadas várias séries de documentos, em que cada uma trata uma subcategoria.

Diagramas gerais

O diagrama geral é um elemento chave do projeto de Instalações Elétricas de BT, pois permite conhecer as características e a constituição geral da instalação.

No diagrama geral são usualmente apresentados os desenhos esquemáticos das redes de distribuição, desde a sua origem até aos quadros terminais que alimentam os aparelhos de utilização e tomadas. No diagrama deverão ser identificadas as características das canalizações, no que diz respeito ao número e secção dos condutores, métodos de instalação, secção e comprimento das canalizações.

No caso de se tratar de instalações coletivas e entradas devem, segundo o DL 517/80, apresentar-se esquemas com a indicação das secções, número de condutores, dimensões e características dos tubos ou condutas, e localização das proteções contra sobreintensidades [16].

Também é útil um diagrama da rede de terras, assim como o esquema de terras a aplicar em cada quadro elétrico da instalação.

Distribuição de Baixa Tensão

Devem ser apresentadas plantas com o traçado e constituição das canalizações, e com a indicação dos elementos indispensáveis à conveniente apreciação do seu dimensionamento [16]. Devem também ser apresentadas os Grupos Geradores, UPS's, e Transformadores BT/BT (como o caso dos transformadores de mudança de regime de neutro e de cortes de energia).

No caso de existirem redes de socorro e/ou de emergência, é comum apresentarem-se peças desenhadas distintas.

Tomadas e equipamentos

O projeto deve apresentar plantas onde seja possível conhecer os locais onde serão instaladas as tomadas e equipamentos, assim como o traçado e identificação dos circuitos que alimentam as mesmas. Estes desenhos devem identificar, de forma inequívoca, os tipos de tomadas a instalar em cada local, no que se refere ao tipo de montagem e índices de proteção (IK e/ou IP).

No caso de existirem redes de socorro, é comum apresentar as tomadas alimentadas por essas redes em peças desenhadas distintas.

Iluminação normal

Devem também existir plantas onde seja possível conhecer os locais onde serão instaladas as luminárias e pontos de luz, assim como o traçado e identificação dos circuitos que alimentam as mesmas e os respectivos comandos. Estas peças desenhadas devem também identificar, de forma inequívoca, os tipos de luminárias e comandos a instalar em cada local, no que se refere ao tipo de montagem e índices de proteção. É também fundamental apresentar desenhos no caso de existirem as luminárias alimentadas por fontes autónomas de energia (baterias).

Iluminação de socorro e de emergência

Em relação à iluminação de socorro e de emergência devem também existir plantas onde sejam apresentados os locais onde serão instaladas as respectivas luminárias, assim como o traçado e identificação dos circuitos que as alimentam, e os respectivos órgãos de comando. Caso o sistema de iluminação de emergência possua uma fonte central, esta deve ser claramente identificada. É essencial apresentar as características das luminárias e os respectivos índices de proteção.

Infraestruturas de Instalações Elétricas

Devem ser apresentados os traçados e constituição das infraestruturas. Devem ser apresentados cortes das valas e travessias, e características e dimensões das câmaras de visita.

Devem também ser apresentados os traçados e constituição dos caminhos ou esteiras de cabos, ductos, e caleiras ou galerias afetas às instalações. É fundamental distinguir o traçado das instalações afetas às redes normais e de socorro das redes de segurança. É boa prática apresentar as dimensões das mesmas. Os caminhos de cabos deverão apresentar a carga por metro de comprimento a suportar.

Aterramento e SPDA

Devem ser apresentadas peças desenhadas que apresentem o traçado e características do sistema de aterramento adotado.

Quando os edifícios forem dotados de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) devem ser apresentadas peças desenhadas que apresentem a sua constituição dos sistemas de captação de descargas atmosféricas, assim como as prumadas dos condutores de ligação e da rede de terras.

Esquema elétrico dos quadros

Os esquemas dos quadros elétricos são geralmente representados sob forma de diagramas unifilares. Estes devem conter as características dos aparelhos e restante equipamento. Deve constar nos diagramas os calibres e tipos de proteções, as dimensões dos barramentos de BT, etc.

Subestações

Nas instalações do tipo B, ou seja instalações que sejam alimentadas por instalações de serviço público em média, alta ou muito alta tensão, devem ser incluídos cortes (pelo menos em duas posições ortogonais), em escala não inferior a 1:50, das dependências onde serão estabelecidas as subestações, postos de corte ou postos de transformação, mostrando, nomeadamente, o equipamento a instalar, sua posição e dimensões, de forma a poder verificar-se se são observadas as disposições dos respetivos regulamentos de segurança [16].

Geradores de energia elétrica

Devem ser apresentadas as plantas, alçados e cortes, em escalas convenientes, dos locais da instalação de geradores de energia elétrica, em número e com pormenores suficientes para se poder verificar a observância das disposições regulamentares de segurança [16].

É importante apresentar e definir a forma como é feita a ventilação do grupo, exaustão de gases e alimentação de combustível.

Outros equipamentos

Segundo o DL 517/80, também será importante apresentar, quando necessário, as plantas, alçados e cortes, em escalas convenientes, dos locais da instalação, com a disposição de equipamentos diversos, tais como transformadores de potência, conversores, retificadores, aparelhagem de corte e de proteção, bem como das caldeiras, turbinas e outras máquinas motoras, em número e com pormenores suficientes para se poder verificar a observância das disposições regulamentares de segurança [16].

4. DIMENSIONAMENTO E CÁLCULOS

4.1 GENERALIDADES

O objetivo deste capítulo é apresentar, de forma sintética, os processos e cálculos envolvidos no dimensionamento de Instalações Elétricas. Este documento resulta da interpretação das RTIEBT em conjugação com as normas internacionais, devido ao já referido vazio regulamentar existente nas RTIEBT, no que diz respeito aos métodos de cálculo de várias grandezas elétricas.

4.2 PARÂMETROS E CARACTERÍSTICAS DOS CONDUTORES

Para que seja possível efetuar dimensionamentos corretos é fundamental ter em conta as corretas características dos materiais em causa, mesmo quando sujeitos a diferentes regimes de funcionamento.

4.2.1 RESISTIVIDADE DAS ALMAS CONDUTORAS

É essencial conhecer as características resistivas dos materiais constituintes das almas condutoras, para que se possam realizar dimensionamentos eficazes.

Segundo a norma CEI 90909-1 a resistividade da alma condutora ρ_0 , considerando os materiais em questão, em $\text{m}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ a 20°C , é descrita pela Tabela 4.1 [15].

	Cobre (Cu) ($\text{m}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)	Alumínio (Al) ($\text{m}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
ρ_0	18,51	29,41

Tabela 4.1 – Resistividade das almas condutoras (Cu e Al).

Devido às propriedades físicas dos materiais em questão, os valores de resistividade variam de acordo com a temperatura a que os mesmos estão sujeitos.

Estando as almas condutoras submetidas a diferentes temperaturas, de acordo com o regime de funcionamento ou defeitos em causa por ação da lei de Joule, é necessário considerar diferentes resistividades para a elaboração dos cálculos, pois estes consideram diferentes regimes de funcionamento ou diferentes tipos de defeito.

Para uma temperatura ambiente de 20°C, a resistividade de um material condutor a uma dada temperatura (cobre ou alumínio), pode ser obtida pela seguinte expressão [15]:

$$\rho_{\theta} = \rho_0 [1 + 0,004 (\theta - 20)] \quad (4.1)$$

em que:

ρ_0 - Resistividade dos condutores a 20°C [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$];

ρ_{θ} - Resistividade dos condutores a uma dada temperatura [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$];

θ - Temperatura do condutor [°C].

4.2.2 RESISTÊNCIAS LINEARES DOS CONDUTORES

A resistência linear de um condutor de uma determinada secção, a 20°C, é dada pela norma CEI 228, que tem em conta os efeitos peliculares e de proximidade, no entanto é admissível, segundo o guia do UTE C 15-500 para secções iguais ou inferiores a 300 mm², utilizar a seguinte expressão [15]:

$$R_L = \frac{\rho_{\theta}}{S} \quad (4.2)$$

em que:

ρ_{θ} - Resistividade elétrica a uma determinada temperatura [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$];

R_L - Resistência linear [Ω/m];

S - Secção da alma condutora [mm²].

Nos cálculos a efectuar, para o dimensionamento de um projeto, são consideradas diferentes temperaturas da alma condutora de acordo com as condições de que lhe sejam impostas, de acordo com o material do isolamento e considerando o caso mais desfavorável dentro dos limites razoáveis, que vão corresponder a determinados valores de resistividade.

Nos cálculos apresentados adiante são requeridos valores de resistividade das almas condutoras a diferentes temperaturas ρ_0 , ρ_1 , ρ_2 , e ρ_3 apresentados na Tabela 4.2, tendo em conta a equação (4.1). As temperaturas associadas aos valores de ρ_0 , ρ_1 , ρ_2 , e ρ_3 estão relacionadas com os diferentes regimes de funcionamento e defeitos que possam surgir nas instalações, e deverão ser aplicados de acordo com a Tabela 4.4.

	PVC		PR EPR (XPPE)	
	Temperatura (°C)	Resistividade (Ω·mm ² /m)	Temperatura (°C)	Resistividade (Ω·mm ² /m)
ρ_0	20°C	1,00· ρ_0	20°C	1,00· ρ_0
ρ_1	70°C	1,20· ρ_0	90°C	1,28· ρ_0
$\rho_2 \leq 300\text{mm}^2$	115°C	1,38· ρ_0	170°C	1,60· ρ_0
$\rho_2 > 300\text{mm}^2$	105°C	1,34· ρ_0	170°C	1,60· ρ_0
$\rho_3 \leq 300\text{mm}^2$	95°C	1,30· ρ_0	140°C	1,48· ρ_0
$\rho_3 > 300\text{mm}^2$	85°C	1,26· ρ_0	140°C	1,48· ρ_0

Tabela 4.2 – Resistividade das almas condutoras em função da temperatura.

Os diferentes valores de resistividade, apresentados na Tabela 4.2, são necessários para determinar os diferentes valores de resistências lineares dos condutores de fase, de neutro e de terra a considerar nos cálculos, pois estes devem considerar diferentes regimes de funcionamento e diversos tipos de defeitos, e portanto para diferentes temperaturas nos condutores. Devem ser calculadas as resistências dos condutores de fase, neutro e proteção (ph , N , PE e PEN)

Assim, definem-se as seguintes variáveis em [15]:

Resistência linear para os condutores de fase (ph), em mΩ/m:

$$R_{C0ph} = \frac{\rho_0}{S_{ph}n_{ph}} \quad R_{C1ph} = \frac{\rho_1}{S_{ph}n_{ph}} \quad R_{C2ph} = \frac{\rho_2}{S_{ph}n_{ph}} \quad (4.3)$$

Resistência linear para os condutores de neutro (N), em mΩ/m:

$$R_{C0N} = \frac{\rho_0}{S_N n_N} \quad R_{C1N} = \frac{\rho_1}{S_N n_N} \quad R_{C2N} = \frac{\rho_2}{S_N n_N} \quad (4.4)$$

Resistência linear para os condutores de proteção (PE ou PEN), em mΩ/m:

$$R_{C0PE} = \frac{\rho_0}{S_{PEN}n_{PE}} \quad R_{C1PE} = \frac{\rho_1}{S_{PEN}n_{PE}} \quad R_{C2PE} = \frac{\rho_2}{S_{PEN}n_{PE}} \quad R_{C3PE} = \frac{\rho_3}{S_{PEN}n_{PE}} \quad (4.5)$$

$$R_{C0PEN} = \frac{\rho_0}{S_{PEN}n_{PEN}} \quad R_{C1PEN} = \frac{\rho_1}{S_{PEN}n_{PEN}} \quad R_{C2PEN} = \frac{\rho_2}{S_{PEN}n_{PEN}}$$

em que:

ρ_0 - Resistividade do material da alma condutora dos condutores a 20°C [mΩ·mm²/m];

ρ_1 - Resistividade do material da alma condutora dos condutores à temperatura de funcionamento estável [mΩ·mm²/m];

ρ_2 - Resistividade do material da alma condutora dos condutores de fase, de neutro e/ou de proteção sob uma temperatura média compreendida entre a temperatura de funcionamento estável e a temperatura final de curto-circuito [$\text{m}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$];

ρ_3 - Resistividade do material da alma condutora dos condutores de proteção distintos do condutor de neutro (PE) sob uma temperatura média compreendida entre a temperatura de funcionamento estável e a temperatura final de curto-circuito [$\text{m}\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$];

n_N - Número de condutores de neutro, de secções iguais, em paralelo;

n_{PE} - Número de condutores de proteção, de secções iguais, em paralelo;

n_{PEN} - Número de condutores PEN (de proteção + neutro incluídos), de secções iguais, em paralelo;

n_{ph} - Número de condutores de fase, de secções iguais, em paralelo;

S_{ph} - Secção dos condutores de fase [mm^2];

S_N - Secção dos condutores de neutro [mm^2];

S_{PE} - Secção dos condutores de proteção [mm^2];

S_{PEN} - Secção dos condutores PEN [mm^2];

$R_{C0ph}/R_{C0N}/R_{C0PE}/R_{C0PEN}$ - Resistência linear para os condutores de fase, de neutro ou de proteção (respectivamente ph , N , PE e PEN) considerando a resistividade dos condutores a 20°C [$\text{m}\Omega/\text{m}$];

$R_{C1ph}/R_{C1N}/R_{C1PE}/R_{C1PEN}$ - Resistência linear para os condutores de fase, de neutro ou de proteção (respectivamente ph , N , PE e PEN) considerando a resistividade dos condutores à temperatura de funcionamento estável [$\text{m}\Omega/\text{m}$];

$R_{C2ph}/R_{C2N}/R_{C2PE}/R_{C2PEN}$ - Resistência linear para os condutores de fase, de neutro ou de proteção (respectivamente ph , N , PE e PEN) considerando a resistividade dos condutores sob uma temperatura média compreendida entre a temperatura de funcionamento estável e a temperatura final de curto-circuito [$\text{m}\Omega/\text{m}$];

R_{C3PE} - Resistência linear para os condutores de proteção distintos do condutor de neutro (PE) considerando a resistividade dos condutores sob uma temperatura média compreendida entre a temperatura de funcionamento estável e a temperatura final de curto-circuito [$\text{m}\Omega/\text{m}$].

Reatância linear dos condutores

Os fenómenos de indução, entre os elementos de um circuito eléctrico, dependem, em grande parte, da disposição relativa dos condutores e, geralmente, são traduzidos por relações relativamente complexas [17].

O valor da reatância linear dos condutores λ , em comparação com o valor da resistência linear, apresenta resultados pouco significativos em termos de cálculos, podendo ser desprezado para os condutores de secção inferior a 25 mm² [15]. No presente trabalho, por razões de simplificação e uniformidade nos cálculos, este valor não é desprezado.

Os valores de reatâncias, λ em mΩ/m, a serem considerados no presente trabalho são [15]:

	λ (mΩ/m)
Cabos multicondutores ou monocondutores em trevo	0,08
Cabos monocondutores juntos lado a lado	0,09
Cabos monocondutores separados	0,13

Tabela 4.3 – Reatância linear dos condutores (λ).

Da Tabela 4.3 verifica-se que para condutores mais afastados, o coeficiente de indução mútua é menor, o que implica que o valor de λ torna-se maior. As reatâncias lineares dos condutores utilizadas nos cálculos apresentados adiante são dadas por:

Para circuitos trifásicos ou bifásicos [15], em mΩ/m:

$$X_C = \frac{\lambda}{n_{ph}} \quad (4.6)$$

Para os circuitos monofásicos e condutores de proteção (*PE* ou *PEN*), em mΩ/m[15]:

$$X_{Cph} = \frac{\lambda}{n_{ph}} \quad X_{CN} = \frac{\lambda}{n_N} \quad X_{CPE} = \frac{\lambda}{n_{PE}} \quad X_{CPEN} = \frac{\lambda}{n_{PEN}} \quad (4.7)$$

em que:

λ - Reatância linear dos condutores [mΩ/m];

X_C - Reatância linear dos condutores em circuitos trifásicos ou bifásicos [mΩ/m];

$X_{Cph}/X_{CN}/X_{CPE}/X_{CPEN}$ - Reatância linear dos condutores em circuitos monofásicos e condutores de proteção (respetivamente *ph*, *N*, *PE* e *PEN*) [mΩ/m].

4.3 SELEÇÃO DAS RESISTIVIDADES E REATÂNCIAS LINEARES

Como já foi referido anteriormente, os cálculos a realizar devem ter em conta as resistividades e reatâncias de acordo com as condições de funcionamento mais desfavoráveis dentro de limites razoáveis. O guia UTE C 15-500 define a seleção das resistividades e

reatâncias lineares a utilizar nos vários cálculos a efetuar para o cálculo da corrente de curto-circuito máxima, da corrente de curto-circuito mínima, da corrente de defeito, e da queda de tensão admissível.

Os valores de resistividade da alma condutora a utilizar em cada cálculo de resistência e reatância lineares (expressões 4.3 a 4.7) são dados pela Tabela 4.2, devendo ser selecionados de acordo com o cálculo que se pretende realizar em conformidade com a Tabela 4.4 [15].

			Condutores Isolados e Cabos					
			Resistividade				Reatância	
Cálculo a realizar	Correntes	Tipo de Circuito	Circuitos a montante	Circuitos em defeito				Todos os circuitos
				Circuito de Distribuição		Circuito Terminal		
Corrente de curto-circuito máxima	$I_{K_{máx}}$	Trifásico	ρ_0	ρ_0		ρ_0		λ
	$I_{K2_{máx}}$	Bifásico	ρ_0	ρ_0		ρ_0		λ
	$I_{K1_{máx}}$	Monofásico	ρ_0	ρ_0		ρ_0		λ
Natureza do dispositivo de proteção			Todos	Fus.	Disj.	Fus.	Disj.	Todos
Corrente de curto-circuito mínima	$I_{K2_{min}}$	Fase-fase	ρ_1	ρ_2	ρ_1	ρ_2	ρ_1	λ
	$I_{K1_{min}}$	Fase-neutro	ρ_1	ρ_2	ρ_1	ρ_2	ρ_1	λ
Corrente de defeito	I_f	PEN incorporado ou separado						
		Fase-PEN	ρ_1	ρ_2	ρ_1	ρ_1	ρ_1	λ
		Fase-PE reduzido	ρ_1	ρ_2	ρ_1	ρ_2	ρ_1	λ
		PE incorporado						
		Fase-PE	ρ_1	ρ_2	ρ_1	ρ_1	ρ_1	λ
		Fase-PE reduz.	ρ_1	ρ_2	ρ_1	ρ_2	ρ_1	λ
PE separado Fase-PE								
	Para a fase:	ρ_1	ρ_2	ρ_1	ρ_1	ρ_1	λ	
	Para o PE	ρ_1	ρ_3	ρ_1	ρ_1	ρ_1	λ	
Para o PE reduzido	ρ_1	ρ_3	ρ_1	ρ_2	ρ_1	λ		
Queda de tensão	I_B	Fase	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	λ
		Fase-neutro	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	ρ_1	λ

Tabela 4.4 – Escolha das resistividades e reatâncias lineares das canalizações.

4.4 CARACTERÍSTICAS DAS FONTES DE ALIMENTAÇÃO

Uma instalação de BT pode ser alimentada de três formas distintas:

- Diretamente a partir da rede de distribuição de BT pública;
- A partir da rede de distribuição de média tensão através de um ou mais transformadores, podendo estes estarem ligados em paralelo;
- Ou através de fontes autônomas como o caso dos grupos geradores.

Existe portanto a necessidade de se conhecer e caracterizar as fontes de alimentação, para que se possam realizar corretos dimensionamentos nas instalações por elas alimentadas.

4.4.1 REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE BAIXA TENSÃO

No caso de instalações serem alimentadas diretamente da rede de distribuição de BT, é necessário obter, junto do distribuidor, determinadas informações, tais como a natureza da corrente e a frequência (valor em regra constante: 50 Hz), o valor da tensão nominal (em regra 230/400 Vac, com as margens de tolerância definidas por regulamentação), o valor da corrente de curto-circuito presumida, na origem da instalação e a possibilidade de satisfazer às necessidades da instalação, incluindo a potência a alimentar [1].

Cálculo da impedância da rede a montante

Na ausência de dados mais concretos, podem ser adotados, para redes subterrâneas, os valores seguintes [1]:

- Potência do transformador - 630 kVA;
- Tensão de curto-circuito - 4% (em 10 kV ou em 15 kV) ou 5% (em 30 kV);
- Secção do cabo da rede de distribuição - 185 mm² de alumínio;
- Comprimento do cabo da rede de distribuição - 20 m.

Em qualquer dos casos, na impossibilidade do distribuidor fornecer dados concretos em relação à impedância de alimentação da rede de BT, considera-se [15]:

$$Z_S = R_S \text{ e } X_S = 0 \quad (4.8)$$

em que:

X_S - Reatância total da fonte (rede mais transformadores) [mΩ];

R_S - Resistência total da fonte (rede mais transformadores) [$m\Omega$];

Z_S - Impedância total da fonte (rede mais transformadores) [$m\Omega$].

4.4.2 REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO

Quando uma instalação elétrica de BT é alimentada em média tensão (MT), por intermédio de um ou mais transformadores, é necessário, para o dimensionamento, ter em conta tanto a impedância da rede como a impedância do transformador.

Cálculo da impedância da rede a montante

De uma forma geral, pontos a montante da fonte de energia não são tomados em conta. Os dados disponíveis da rede a montante são limitados apenas à informação do distribuidor sobre a potência de curto-circuito S_{cc} , em MVA [18].

A impedância equivalente da rede a montante, em $m\Omega/m$, é dada por [15]:

$$Z_Q = \frac{(mU_n)^2}{S_{KQ}} \quad (4.9)$$

em que:

U_n - Tensão nominal da instalação entre fases [V];

S_{KQ} - Potência de curto-circuito da rede de MT [kVA];

m - Fator de carga em vazio (m é tomado igual a 1,05 qualquer que seja a fonte);

Z_Q - Impedância da rede a montante dos transformadores [$m\Omega$].

No caso de não existir informações mais precisas por parte do distribuidor, deve-se considerar de acordo com a norma CEI 909 [15]:

$$R_Q = 0,100X_Q \text{ e } X_Q = 0,995Z_Q \quad (Z_Q = \sqrt{R_Q^2 + X_Q^2}) \quad (4.10)$$

em que:

R_Q - Resistência da rede a montante dos transformadores [$m\Omega$];

X_Q - Reatância da rede a montante dos transformadores [$m\Omega$].

Cálculo da impedância dos transformadores de potência

Para além de se considerar a impedância da rede a montante e dos cabos de BT nos cálculos a efetuar, também é necessário ter em consideração a impedância dos transformadores que eventualmente existam na instalação, tendo estes a função de reduzir a

tensão de média para baixa tensão (BT), ou outros transformadores que sejam eventualmente utilizados para alterar o sistema de terras.

No caso de existir ausência desta informação por parte dos fornecedores, aplica-se [15]:

$$Z_T = \frac{(mU_n)^2}{S_{rT}} \frac{u_{kr}}{100} \quad (4.11)$$

em que:

U_n - Tensão nominal da instalação entre fases (do secundário) [V];

Z_T - Impedância do transformador de potência (do secundário) [mΩ];

S_{rT} - Potência estipulada do transformador [kVA];

u_{kr} - Tensão de curto-circuito do transformador [%].

Não existindo informações mais precisas por parte do distribuidor, deve-se considerar:

$$R_T = 0,31Z_T \text{ e } X_T = 0,95Z_T \quad (Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_T^2}) \quad (4.12)$$

em que:

R_T - Resistência do transformador de potência [mΩ];

X_T - Reatância do transformador de potência [mΩ].

4.4.3 GERADORES

No caso da instalação ser alimentada através de um ou mais geradores, por razões de indisponibilidade de redes de distribuição no local, por motivos de continuidade de serviço ou de emergência, é necessário ter em conta a possibilidade de satisfazer as necessidades da instalação em termos de autonomia, tensão, potência, frequência e a corrente de curto-circuito que pode ser obtida através da sua impedância.

Cálculo da impedância de geradores

A reactância transitória do gerador de BT, X'_d em mΩ, é dada por [15]:

$$X'_d = \frac{U_n^2}{S_{rG}} \frac{x'_d}{100} \quad (4.13)$$

em que:

U_n - Tensão nominal da instalação entre fases (BT) [V];

S_{rG} - Potência estipulada do gerador [kVA];

x'_d - Reactância transitória [%].

A reactância homopolar transitória do gerador, X_0 em $m\Omega$, é dada por [15]:

$$X_0 = \frac{U_n^2}{S_{rG}} \frac{x_0}{100} \quad (4.14)$$

em que:

x_0 - Reactância homopolar [%].

Na falta de informações mais concretas, tem-se:

- 30% para x'_d ;
- 30% para x_0 .

4.5 FATOR DE TENSÃO (C)

Torna-se necessário, em determinados cálculos, a introdução de um fator multiplicativo de segurança, o fator de tensão C , considerando-se como fator de correção que considera o caso mais desfavorável, de acordo com a norma CEI 909.

Este fator tem o objectivo de considerar o caso mais desfavorável das variações da tensão de alimentação dadas em função do tempo, da localização, das tomadas de regulação dos transformadores e de outras considerações [15].

<i>Tensão nominal</i>	<i>Fator de tensão C</i>	
	$C_{m\acute{a}x}$	$C_{m\acute{i}n}$
<i>100V a 1000V</i>	1,05	0,95

Tabela 4.5 – Fator de tensão C.

4.6 CARACTERÍSTICAS DOS DISPOSITIVOS DE CORTE E DE PROTEÇÃO

4.6.1 GENERALIDADES

Os cálculos de uma instalação elétrica baseiam-se em duas premissas fundamentais:

- A correta seleção de canalizações que permita a alimentação das cargas;
- A proteção das canalizações seleccionadas.

A proteção das canalizações é feita por dispositivos de proteção com a finalidade de as protegerem contra os diferentes tipos de defeitos que possam acontecer.

4.6.2 DISJUNTORES

Um disjuntor pode ser definido como um aparelho eletromecânico de conexão capaz de estabelecer, de suportar e de interromper correntes nas condições normais do circuito. Este aparelho é ainda capaz de estabelecer, de suportar num tempo especificado, e de interromper correntes em condições anormais especificadas para o circuito, tais como as correntes de curto-circuito e as correntes provenientes de defeitos de isolamento [1].

O princípio de funcionamento dos disjuntores baseia-se num órgão de corte com a função de interromper o circuito atuado por um disparador através de um relé com a função de detetar sobreintensidades (sobrecargas e curto-circuitos), em que os arcos elétricos são extintos por um dispositivo próprio.

Em relação aos disjuntores mais vulgares, fabrica-se o disjuntor magnetotérmico que possui um relé electromagnético que protege um troço de circuito contra curto-circuitos, e um relé térmico, constituído por uma lâmina bimetálica, que protege um troço de circuito contra sobrecargas [19].

Os disjuntores que geralmente também têm a função de seccionamento, sendo portanto designados de forma técnica como Disjuntores-Seccionadores, assumem as funções base necessárias às Instalações Elétricas nomeadamente [20]:

- O seccionamento;
- O comando;
- O corte para manutenção mecânica;
- A proteção contra:
 - As sobrecargas;
 - Os curto-circuitos;
 - Os defeitos de isolamento (segundo o esquema de ligação à terra, pode ser necessário um relé diferencial);
 - As baixas de tensão (com bobina de falta de tensão);
- O telecomando (com comando elétrico ou disjuntor telecomandado);
- A medida/sinalização (geralmente em opção com disparador eletrónico);
- O corte e paragem de urgência quando associados a bobinas de disparo e comandos à distância.

Descrevem-se adiante as principais características dos disjuntores:

Tensão estipulada de serviço (U_e)

Representa a gama de tensões às quais o dispositivo se destina (geralmente $\cong 1,2 \cdot U_n$, em que U_n representa a tensão nominal).

Corrente estipulada (I_n)

É o valor máximo da corrente ininterrupta que pode suportar um disjuntor equipado com um disparador a uma temperatura ambiente indicada pelo construtor, respeitando os limites de aquecimento prescritos [20]. Este valor é geralmente limitado pela corrente de proteção térmica.

Corrente de regulação (I_r)

Os disjuntores de gama industrial apresentam frequentemente a possibilidade de regularem a corrente de disparo para valores inferiores à sua corrente estipulada (I_n). Geralmente estes disjuntores permitem a regulação dos disparadores térmicos para valores entre 0,7 a 1 vezes o valor de I_n . Existem ainda alguns fabricantes que disponibilizam disparadores eletrónicos que possibilitam maiores margens de regulação.

Polaridade dos disjuntores

Este parâmetro refere-se ao número de polos cortados quando ocorre um disparo, ou a abertura do disjuntor, e os que são efetivamente protegidos por um relé térmico. A polaridade dos disjuntores varia de acordo com as características das instalações e com o regime de terras adotado.

Poder de corte

O poder de corte de um disjuntor pode ser definido como a maior intensidade de corrente de curto-circuito que um disjuntor pode interromper sob uma tensão predeterminada. O poder de corte exprime-se geralmente em kA eficaz simétrico, e é designado por I_{cu} [20].

O poder de corte de um disjuntor deve ser maior ou igual à corrente máxima de curto-circuito presumida no local de instalação considerado [15], podendo também os dispositivos estarem coordenados entre si, cumprindo as normas de filiação que devem ser, para diferentes calibres, sempre asseguradas pelo mesmo fabricante.

Sendo a filiação entre dispositivos dada através de tabelas fornecidas pelos vários fabricantes sem existir um padrão concreto, não será âmbito deste projeto o cálculo e

determinação da filiação entre equipamentos. Irá apenas ser calculado o poder de corte necessário para as proteções calculadas, podendo o poder de corte das proteções ser adaptado às tabelas de filiação dos fabricantes.

Proteção diferencial

Um dispositivo sensível à corrente diferencial-residual pode ser definido, segundo as RTIEBT, como um aparelho eletromecânico, ou associação de aparelhos, destinados a provocar a abertura dos contactos quando a corrente diferencial-residual atingir, em condições especificadas, um dado valor pré-definido.

As proteções diferenciais podem estar diretamente integradas nos próprios disjuntores (os vulgares disjuntores e interruptores diferenciais), ou podem ser constituídas por um dispositivo de deteção de defeito diferencial independente, associado a um disparador atuando num aparelho de corte ou de proteção.

Nas Instalações Elétricas são utilizados tipos de disjuntores diferenciais e dispositivos que permitem múltiplas regulações [20]:

- Sensibilidade: Valor da corrente diferencial-residual que provoca o disparo do equipamento;
- Classe: Existem aparelhos com a designação de “imunizado” aptos para funcionar em redes com forte componente harmónica.

Corrente máxima instantânea de funcionamento (I_m)

Corresponde à corrente máxima instantânea de funcionamento (I_m) dos disparadores de curto-circuito ou também denominada como proteção magnética. Os dispositivos poderão ter o princípio de funcionamento magnético, ou atuar através de um dispositivo eletrónico regulável que provoca um disparo geralmente denominado de “curto atraso”.

A função dos disparadores de curto-circuito (magnético ou de curto atraso) é provocar a abertura rápida do disjuntor para as fortes sobreintensidades [20].

A corrente máxima instantânea de funcionamento é a corrente que provoca a abertura imediata do disjuntor, então para que o funcionamento dos disjuntores seja instantâneo, é necessário que a corrente de defeito, ou a corrente de curto-circuito, seja superior à corrente máxima instantânea de funcionamento do disjuntor.

Os disjuntores fabricados segundo a norma EN 60898 têm as seguintes correntes instantâneas [15]:

Curva característica do disjuntor:	Corrente máxima instantânea de funcionamento (I_m)
B	$5 \cdot I_n$
C	$10 \cdot I_n$
D	$20 \cdot I_n$

Tabela 4.6 – Correntes máximas instantâneas de funcionamento dos disjuntores.

Segundo o guia UTE 15-100 os disjuntores fabricados segundo a norma EN 60947-2 têm as seguintes correntes instantâneas maiores ou iguais a 1,2 vezes a corrente de regulação com uma tolerância de 20%.

4.6.3 FUSÍVEIS

Um fusível pode ser definido como um aparelho cuja função é a de interromper, por fusão de um ou mais dos seus elementos concebidos e calibrados para esse efeito, o circuito no qual está inserido, cortando a corrente quando esta ultrapassar, num tempo suficiente, um dado valor pré-definido [1]. A corrente de funcionamento a ser levada em conta é então a corrente convencional de fusão [15].

Existem duas normas usuais para o fabrico de fusíveis, a norma EN 60269-2 responsável pela normalização dos fusíveis do tipo aM (de acompanhamento), e a NF C-213 responsável pela normalização dos fusíveis do tipo gG (de sobreintensidades).

O tempo de fusão dos fusíveis poderá ser determinado pela seguinte expressão [15]:

$$I^n t = a \quad (4.15)$$

sendo:

- $n = 4$ para fusíveis gG;
- $n = 4,55$ para fusíveis aM.

em que:

a - Corresponde a I_n (corrente estipulada) para o tempo de fusão de 1 segundo [A];

I - Corrente no circuito [A];

t - Tempo em segundos.

Principais características dos fusíveis

Um fusível é caracterizado por [20]:

- Calibre;
- Poder de corte;
- A sua forma que é definida por um tipo (ou norma) e um tamanho;

- Um porta-fusíveis que é caracterizado por:
 - Tipo: seccionador ou interruptor-seccionador;
 - Calibre;
 - Número de pólos.

4.6.4 INTERRUPTORES

Um interruptor pode ser definido como um aparelho eletromecânico de conexão capaz de estabelecer, suportar e interromper correntes nas condições normais do circuito, incluindo, eventualmente, as condições especificadas de sobrecarga em serviço. Este aparelho é ainda capaz de suportar, num tempo especificado, correntes nas condições anormais especificadas para o circuito, tais como as resultantes de um curto-circuito [1].

4.7 PROTEÇÃO CONTRA SOBRECARGAS

Devem ser previstos dispositivos de proteção que interrompam as correntes de sobrecarga dos condutores dos circuitos antes que estas possam provocar aquecimentos prejudiciais ao isolamento, às ligações, às extremidades ou aos elementos colocados nas proximidades das canalizações [1].

Segundo as RTIEBT, as características de funcionamento dos dispositivos de proteção das canalizações contra as sobrecargas devem satisfazer, simultaneamente, às duas condições seguintes [1]:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \text{ e } I_2 \leq 1,45I_Z \quad (4.16)$$

em que:

I_B - Corrente de serviço do circuito [A];

I_n - Corrente estipulada do dispositivo de proteção [A];

I_Z - Corrente admissível na canalização [A];

I_2 - Corrente convencional de funcionamento do dispositivo de proteção [A].

4.7.1 CORRENTE DE SERVIÇO (I_B)

Pode ser definida como a corrente destinada a ser transportada por um circuito em serviço normal [1].

O cálculo da corrente de serviço de um dado circuito está relacionado com o número de equipamentos alimentados por ele próprio, a potência dos equipamentos, o fator de simultaneidade, bem como o fator de potência.

Pode ser também definida como a corrente máxima prevista para um dado circuito em situações de normal funcionamento.

4.7.2 CORRENTE ESTIPULADA DO DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO (I_n)

Como já definido em (4.6.2), I_n é o valor máximo da corrente ininterrupta que pode suportar um fusível ou um disjuntor equipado com um disparador a uma temperatura ambiente indicada pelo construtor, respeitando os limites de aquecimento prescritos [20].

Para os dispositivos de proteção reguláveis considera-se a corrente de regulação I_r .

4.7.3 CORRENTE ADMISSÍVEL NUMA CANALIZAÇÃO (I_z)

A corrente admissível numa canalização corresponde ao valor máximo da corrente que pode percorrer, em permanência, uma canalização em dadas condições sem que a sua temperatura, em regime permanente, ultrapasse um valor especificado [1].

Analisando as RTIEBT verifica-se que as correntes admissíveis, numa dada canalização, dependem das seguintes condições:

- Tipos de isolamento – Devido ao facto de as temperaturas máximas de funcionamento variarem de acordo com o isolamento utilizado;
- Temperatura ambiente – Devido ao facto de a dissipação de calor de uma dada canalização depender da temperatura ambiente em que a mesma está envolvida;
- Número de condutores carregados num circuito – Devido ao facto de os vários condutores dissiparem simultaneamente energia térmica;
- Métodos de instalação das canalizações.

No presente trabalho considera-se que as correntes máximas admissíveis para uma dada canalização devem ser dadas através dos Quadros 52-C1 a 52-C14 das RTIEBT, considerando os fatores de correção dos Quadros 52-D1 a 52-E6 das mesmas RTIEBT.

Nos casos em que existam taxas de distorção harmónica da corrente superior a 15%, deve ser considerado um fator de redução da corrente admissível no condutor de neutro com um valor igual a 0,84 de acordo com o guia UTE-15-105.

4.7.4 CORRENTE CONVENCIONAL DE FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO

A corrente convencional de funcionamento corresponde à corrente que assegura efetivamente o funcionamento do dispositivo de proteção, dentro do chamado tempo convencional [15].

Ou seja, corresponde [1]:

- à corrente de funcionamento, no tempo convencional, para os disjuntores;
- à corrente de fusão, no tempo convencional, para os fusíveis do tipo gG.

Sendo, segundo as RTIEBT, dada por:

$$I_2 = K_2 I_n \quad (4.17)$$

em que:

K_2 - A relação entre o valor da corrente I_2 que garante o funcionamento efetivo do dispositivo de proteção e a sua corrente estipulada I_n (ou, para os disjuntores com regulação, o valor da corrente de regulação $-I_r$), com todas as correntes em A, em que:

- $K_2 = 1,45$ para os disjuntores modulares (EN 60898);
- $K_2 = 1,3$ para outros disjuntores;
- $K_2 = 1,6$ para fusíveis com $I_n \geq 16$ A;
- $K_2 = 1,9$ para fusíveis com $4 \text{ A} < I_n < 16 \text{ A}$;
- $K_2 = 2,1$ para fusíveis com $I_n \leq 4 \text{ A}$.

4.8 DETERMINAÇÃO DO PODER DE CORTE DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

4.8.1 CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Ao dimensionar uma Instalação Elétrica, é necessário ter em conta todas as correntes de curto-circuito suscetíveis de ocorrer, quer em caso de defeito, quer em qualquer situação operacional.

Um curto-circuito pode ser definido como uma sobreintensidade resultante de um defeito de impedância desprezável entre condutores ativos que apresentem, em serviço normal, uma determinada diferença de potencial [1].

Segundo as RTIEBT, todas correntes de curto-circuito presumidas devem ser determinadas, por um método de cálculo ou por medição, e em todos os pontos das instalações julgados necessários (RTIEBT), devendo os equipamentos poder suportar, sem

perigo, as solicitações resultantes das correntes de curto-circuito suscetíveis de os percorrerem [1].

Existem dois valores distintos de correntes de curto-circuito, que devem ser levados em conta, a corrente de curto-circuito máxima e a corrente de curto-circuito mínima ou de defeito [21].

A corrente máxima de curto-circuito é utilizada para determinar:

- O poder de corte dos disjuntores: com a previsão da corrente máxima de curto-circuito no ponto da rede onde estão instalados, tem-se o limite inferior do poder de corte destes dispositivos [22];
- Previsão dos esforços térmicos e eletrodinâmicos provocados pela passagem da corrente: em todos os elementos da rede, sobretudo pontos nevrálgicos, como barramentos e seccionadores, que terão que suportar os efeitos destrutivos da passagem das correntes de curto-circuito [22];
- Regulação das proteções: a especificação das correntes e tempos de disparo das proteções baseia-se nos valores previstos da corrente de curto-circuito [22].

O cálculo da corrente de curto-circuito máxima, num determinado ponto de uma instalação, deve basear-se na suposição que o mesmo ocorre imediatamente a jusante desse ponto, nas condições de operacionalidade da instalação que lhe confirmam um valor máximo, considerando uma margem de segurança. Nas condições de operacionalidade deve ser considerada cada uma das fontes de alimentação, ou para cada combinação de fontes que possa funcionar em conjunto, não descorando a rede de distribuição [1].

Corrente de curto-circuito máxima trifásica ($I_{K3máx}$)

A corrente de curto-circuito máxima trifásica $I_{K3máx}$, em kA, é dada por [15]:

$$I_{K3máx} = \frac{C_{máx} m U_0}{Z} = \frac{C_{máx} m U_0}{\sqrt{(R_s + R_u + R_{0ph})^2 + (X_s + X_u + X_{ph})^2}} \quad (4.18)$$

$$\text{sendo: } R_{0ph} = R_{C0ph} L_{1u} \quad \text{e} \quad X_{ph} = X_C L_{1u} \quad (4.19)$$

em que:

$I_{K3máx}$ - Corrente de curto-circuito máxima trifásica [kA];

$C_{máx}$ - Fator de tensão máximo;

m - Fator de carga em vazio (m é tomado igual a 1,05 qualquer que seja a fonte);

U_0 - Tensão nominal entre fase e terra (valor eficaz em corrente alternada) [V];

Z - Impedância total de fase a montante [$m\Omega$];

R_s - Resistência total de fase da fonte [$m\Omega$];

X_s - Reatância total de fase da fonte [$m\Omega$];

R_u - Resistência do condutor de fase a montante do circuito considerado [$m\Omega$];

X_u - Reatância do condutor de fase a montante do circuito considerado [$m\Omega$];

L_{1u} - Corresponde aos comprimentos relativos aos circuitos a montante do dispositivo de proteção [m].

R_{0ph} - Resistência dos condutores de fase (ph) considerando a resistividade dos condutores a 20°C [$m\Omega$], sendo R_{C0ph} a resistência por unidade de comprimento [$m\Omega/m$];

X_{ph} - Reatância dos condutores de fase (ph) [$m\Omega$], sendo X_C a reatância por unidade de comprimento;

e sendo:

R_s e X_s - Dados pela Tabela 4.7.

Corrente de curto-circuito máxima bifásica ($I_{K2m\acute{a}x}$)

A corrente de curto-circuito máxima bifásica $I_{K2m\acute{a}x}$, em kA, é dada por [15]:

$$I_{K2m\acute{a}x} = 0,86 I_{K3m\acute{a}x} \quad (4.20)$$

Corrente de curto-circuito máxima monofásica ($I_{K1m\acute{a}x}$)

A corrente de curto-circuito máxima monofásica $I_{K1m\acute{a}x}$, em kA, é dada por [15]:

$$I_{K1m\acute{a}x} = \frac{C_{max}mU_0}{Z} = \frac{C_{max}mU_0}{\sqrt{(R_s + R_u + R_N + R_{0phN})^2 + (X_s + X_u + X_N + X_{phN})^2}} \quad (4.21)$$

sendo:

$$R_{0phN} = (R_{C0ph} + R_{CON})L_{1u} \quad \text{e} \quad X_{phN} = (X_{Cph} + X_{CN})L_{1u} \quad (4.22)$$

ou no caso de utilização de condutores PEN, de (4.21) ter-se-á R_{0phPEN} e X_{phPEN} em vez de R_{0phN} e X_{phN} , respectivamente, sendo:

$$R_{0phPEN} = (R_{C0ph} + R_{COPEN})L_{1u} \quad \text{e} \quad X_{phPEN} = (X_{Cph} + X_{CPEN})L_{1u} \quad (4.23)$$

em que:

R_N - Resistência do condutor de neutro a montante do circuito considerado [$m\Omega$];

X_N - Reatância do condutor de neutro a montante do circuito considerado [$m\Omega$];

R_{0phN} - Resistência para os condutores de fase e de neutro (ph e N) considerando a resistividade dos condutores a 20°C [mΩ];

X_{phN} - Reatância para os condutores de fase e de neutro (ph e N) [mΩ];

R_{0phPEN} - Resistência para os condutores de fase e de proteção (ph e PEN) considerando a resistividade dos condutores a 20°C [mΩ];

X_{phPEN} - Reatância para os condutores de fase e de proteção (ph e PEN) [mΩ];

sendo os valores de R_s e X_s , dados por (Tabela 4.7):

	R_s	X_s
Transformador triângulo-estrela (Δy)	$R_Q + R_T$	$X_Q + 0,9X_T$
Transformador estrela-estrela (Yy)	$R_Q + R_T$	$X_Q + 4X_T$
Transformador estrela/triângulo-ziguezague ($Yd-z$)	$R_Q + 0,8R_T$	$X_Q + 0,8X_T$
Alimentação em BT	R_Q	X_Q

Tabela 4.7 – Valor das impedâncias para o cálculo de correntes máximas de curto-circuito.

4.9 PROTEÇÃO CONTRA CONTACTOS INDIRETOS

De acordo com as RTIEBT, as pessoas e os animais devem ser protegidos contra os perigos que possam resultar de um contacto com as massas, em caso de defeito. Esta proteção pode ser feita de acordo com as RTIEBT, e ser garantida por um dos métodos seguintes:

- Medidas que impeçam a corrente de defeito de percorrer o corpo humano ou o corpo de um animal:
 - Proteção por utilização de equipamentos da classe II (RSIUEE), ou por isolamento equivalente;
 - Proteção por recurso a locais não condutores;
 - Proteção por ligações equipotenciais em locais não ligados à terra;
 - Proteção por separação elétrica.
- Limitação da corrente de defeito que possa percorrer o corpo a um valor inferior ao da corrente de choque:

- Proteção por limitação da energia de descarga;
 - Proteção por tensão reduzida TRS ou TRP;
 - Proteção por tensão reduzida funcional (TRF).
- Corte automático, num tempo determinado, após o aparecimento de um defeito suscetível de, em caso de contacto com as massas, ocasionar a passagem através do corpo de uma corrente de valor não inferior ao da corrente de choque.

A proteção por corte automático da corrente de alimentação pressupõe que qualquer defeito que surja num equipamento elétrico, origina a circulação de uma corrente de defeito com intensidade suficiente para que os dispositivos de proteção a possam detetar e interromper num período de tempo bem definido, que não ponha em causa a segurança das pessoas, e assim devem ser reunidas as seguintes condições [1]:

- a) A realização ou a existência de um circuito (designado por "malha de defeito") que permita a circulação da corrente de defeito, realizado de acordo com os diferentes esquemas de ligações à terra (TN, TT ou IT), e que permita a circulação de uma determinada corrente de defeito;
- b) O corte da corrente de defeito seja efetuado por um dispositivo de proteção apropriado, num tempo que depende de certos parâmetros (tais como a tensão de contacto e a probabilidade de defeitos e de contactos com as partes afetadas), sendo esse tempo determinado a partir do conhecimento dos efeitos da corrente elétrica no corpo humano.

A proteção por corte automático tem o objectivo de impedir que partes condutoras, simultaneamente acessíveis, possam manter-se durante um tempo suficiente para criar riscos de efeitos fisiopatológicos perigosos para as pessoas, ou seja, tensões de contacto presumidas superiores às tensões limites convencionais (U_L) seguintes:

- $U_L = 50$ V em corrente alternada (valor eficaz);
- $U_L = 120$ V em corrente contínua lisa.

4.9.1 PROTEÇÃO CONTRA CONTACTOS INDIRETOS EM ESQUEMA TT

O esquema TT pressupõe, de acordo com as RTIEBT, que todas as massas dos equipamentos elétricos, protegidos por um mesmo dispositivo de proteção, devem ser interligadas por meio de condutores de proteção e ligadas ao mesmo eléctrodo de terra. Quando existir mais do que um dispositivo de proteção (em série) esta regra aplica-se, separadamente, a todas as massas protegidas pelo mesmo dispositivo e que o ponto neutro ou, se este não existir, uma fase de cada transformador ou gerador, deve ser ligado à terra.

Este esquema de ligações pressupõe a existência de baixas correntes de defeito devido à existência de terras distintas, portanto, deve ser verificado que qualquer corrente de defeito que possa surgir não eleve a tensão de contacto de uma determinada massa, para um valor que coloque em risco a segurança das pessoas, ou seja, acima dos limites convencionais.

Deve-se, segundo as RTIEBT, verificar a seguinte condição:

$$R_A I_A \leq 50 \text{ V} \quad (4.24)$$

sendo:

$$R_A I_A = U_C \quad (4.25)$$

em que:

R_A - Corresponde soma das resistências do eléctrodo de terra e dos condutores de proteção das massas [Ω];

I_A - Corrente que garante o funcionamento automático do dispositivo de proteção [A];

U_C - Tensão de contacto [V] (deve ser sempre menor ou igual a U_L - tensão limite convencional de contacto).

Devido às baixas correntes de defeito inerentes ao esquema de ligação de terras TT e por disposições regulamentares, é geralmente imposta a utilização de dispositivos diferenciais, neste caso a corrente I_A corresponde à corrente diferencial-residual estipulada $I_{\Delta n}$.

Não é usualmente recomendável na proteção a utilização de dispositivos de protecção contra sobrintensidades, como proteção contra contactos indirectos no esquema TT devido às baixas correntes de defeito inerentes ao sistema, no entanto, segundo as RTIEBT, quando a proteção for garantida por um dispositivo contra sobrintensidades, a corrente I_A corresponde à corrente que:

- a) Garante o funcionamento automático num tempo não superior a 5 s, quando o dispositivo tiver uma característica de tempo inverso;

- b) Garante o funcionamento instantâneo, quando o dispositivo tiver uma característica de funcionamento instantâneo.

4.9.2 PROTEÇÃO CONTRA CONTACTOS INDIRETOS EM ESQUEMA TN

O esquema TN pressupõe, de acordo com as RTIEBT, que todas as massas da instalação devem ser ligadas ao ponto da alimentação ligado à terra, próximo do transformador ou do gerador de alimentação da instalação, por meio de condutores de proteção e que o ponto de alimentação ligado à terra é, em regra, o ponto neutro.

Devido às características deste sistema de terras, as correntes de defeito previsíveis são relativamente elevadas, sendo geralmente suficientes para a atuação das proteções contra sobreintensidades.

É portanto imperativo verificar que as características dos dispositivos de proteção e as impedâncias dos circuitos sejam tais que, se produzir, em qualquer ponto, um defeito de impedância desprezável entre um condutor de fase e o condutor de proteção ou uma massa, e o corte automático seja efetuado num tempo não inferior ao valor especificado, de forma a que se verifique a condição seguinte [1]:

$$Z_s I_A \leq U_0 \quad (4.26)$$

Podendo ser escrita por:

$$I_A \leq \frac{U_0}{Z_s} \quad (4.27)$$

em que:

Z_s - Impedância da malha de defeito (incluindo na fonte de alimentação, o condutor ativo até ao ponto do defeito, e o condutor de proteção entre o ponto de defeito e a fonte de alimentação) [Ω];

I_A - Corrente que garante o funcionamento do dispositivo de corte automático no tempo indicado na Tabela 4.8, ou nas condições indicadas na secção num tempo não superior a 5 s, em ampère (quando se utilizarem dispositivos diferenciais, I_A é a corrente diferencial - residual estipulada $I_{\Delta n}$).

Considerando que a corrente de defeito é dada por:

$$I_f = \frac{U_0}{Z_s} \quad (4.28)$$

em que:

I_f - Corrente de defeito [A].

Assim, verifica-se que a seguinte condição deve ser cumprida:

$$I_A \leq I_f \quad (4.29)$$

A norma HD 384.4.41 estipula os seguintes tempos máximos de corte:

Para o esquema TN:

Tensão Nominal U_0 [V]	Tempo de máximo corte em segundo [s]
120 - 127	0,8
220 - 230	0,4
380 - 400	0,2
> 400	0,1

Tabela 4.8 – Tempos máximos de corte para o esquema TN.

4.9.3 PROTEÇÃO CONTRA CONTACTOS INDIRETOS EM ESQUEMA IT

O esquema IT pressupõe, de acordo com as RTIEBT, que as partes ativas devem ser isoladas da terra ou ligadas a esta através de uma impedância de valor suficientemente elevado; esta ligação deve ser feita no ponto neutro da instalação ou num ponto neutro artificial, que pode ser ligado diretamente à terra se a impedância homopolar correspondente tiver um valor adequado. Quando não existir ponto neutro, uma das fases pode ser ligada através de uma impedância.

O corte não é obrigatório quando ocorrer um único defeito (à massa ou à terra), dado que a corrente de defeito resultante é de reduzido valor, o que provoca tensões de contacto manifestamente inferiores às do limite máximo.

A proteção pode ser realizada através da isolação das partes ativas da terra ou cumprindo a condição (4.30) através da escolha de uma impedância de valor suficientemente elevado que provoque um reduzido valor de corrente de defeito, independentemente do valor de impedância da malha de defeito.

$$R_A I_f \leq 50 \text{ V} \quad (4.30)$$

em que:

R_A - Soma das resistências do eléctrodo de terra e dos condutores de proteção das massas, em Ω .

Quando ocorrer um segundo defeito e o primeiro defeito ainda não tiver sido eliminado, a alimentação deve, consoante o modo de ligação das massas à terra, ser interrompida nas condições de forma a evitar riscos de efeitos fisiopatológicos perigosos, para as pessoas que possam ficar em contacto com partes condutoras simultaneamente acessíveis [1].

Quando as massas estiverem ligadas à terra, individualmente ou por grupos, o esquema da instalação IT transforma-se num esquema TT, sendo-lhe aplicáveis as regras de proteção indicadas na secção 4.9.1.

Quando as massas estiverem interligadas, o esquema da instalação IT transforma-se num esquema TN, sendo-lhe aplicáveis as condições indicadas no ponto 4.9.2.

Para o 2º defeito do esquema IT [15]:

Tensão Nominal U_0/U_n [V]	Tempo máximo de Corte em Segundos [s]	
	Neutro não distribuído	Neutro distribuído
120/220; 127/230	0,8	5
220/380; 230/400	0,4	0,8
460/690	0,2	0,4

Tabela 4.9 – Tempos máximos de corte para o esquema IT.

4.10 CÁLCULO DA CORRENTE DE DEFEITO

De acordo com o referido nos pontos anteriores, verifica-se que para efeitos de determinação do tempo de corte máximo é essencial calcular a corrente de defeito I_f . Esta corrente deve ser calculada para o caso mais desfavorável, ou seja, na extremidade do circuito a jusante da proteção.

A temperatura para a qual a resistência do condutor é determinada, depende das características do dispositivo de proteção e da configuração do circuito [15]. A resistividade a utilizar é escolhida de acordo com as Tabelas 4.8 e 4.9.

A corrente de defeito I_f , em kA, é dada por [15]:

$$I_f = \frac{C_{min} m \alpha U_0}{\sqrt{(R_s + R_u + R_{PE} + R_{0phPE})^2 + (X_s + X_u + X_{PE} + X_{phPE})^2}} \quad (4.31)$$

sendo:

$$R_{0phPE} = (R_{C0ph} + R_{COPE})L_{Id} \quad e \quad X_{phPE} = (X_{Cph} + X_{CPE})L_{Id} \quad (4.32)$$

ou no caso de utilização de condutores PEN, de (4.31) ter-se-á R_{0phPEN} e X_{phPEN} em vez de R_{0phPE} e X_{phPE} , respectivamente, sendo:

$$R_{0phPEN} = (R_{C0ph} + R_{COPEN})L_{Id} \quad e \quad X_{phPEN} = (X_{Cph} + X_{CPEN})L_{Id} \quad (4.33)$$

em que:

C_{min} - Fator de tensão mínimo;

m - Fator de carga em vazio (m é tomado igual a 1,05 qualquer que seja a fonte);

R_{PE} - Resistência do condutor de proteção entre a ligação equipotencial principal e a origem do circuito considerado [mΩ];

X_{PE} - Reatância do condutor de proteção entre a ligação equipotencial principal e a origem do circuito considerado [mΩ];

R_{phPE} - Resistência para os condutores de fase e de proteção (ph e PE) [mΩ];

X_{phPE} - Reatância para os condutores de fase e de proteção (ph e PE) [mΩ];

R_{phPEN} - Resistência para os condutores de fase e de proteção (ph e PEN) [mΩ];

X_{phPEN} - Reatância para os condutores de fase e de proteção (ph e PEN) [mΩ];

L_{Id} - Corresponde aos comprimentos relativos aos circuitos a montante e a jusante do dispositivo de proteção [m].

α - Coeficiente que depende do sistema de ligação à terra, que é igual a 1 para sistemas TN e TT, 0,86 para o sistema IT sem neutro distribuído, e 0,50 para o sistema IT com neutro distribuído;

sendo agora os valores de R_s (Resistência total de fase da fonte [mΩ]) e X_s (Reatância total de fase da fonte [mΩ]), dados por:

	R_s	X_s
Transformador triângulo-estrela (Δy)	$R_Q + R_T$	$X_Q + 0,9X_T$
Transformador estrela-estrela (Yy)	$R_Q + R_T$	$X_Q + 4X_T$
Transformador estrela/triângulo-ziguezague ($Yd-z$)	$R_Q + 0,8R_T$	$X_Q + 0,8X_T$
Alimentação em BT	R_Q	X_Q
Gerador	0	$\frac{2X'_d + X_0}{3}$

Tabela 4.10 – Valores das impedâncias para o cálculo de correntes máximas de defeito.

em que:

X'_d - Reactância transitória do alternador [mΩ];

X_0 - Reactância homopolar transitória do alternador [mΩ].

4.11 VERIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS CONDUTORES

Em caso de curto-circuito, os condutores são submetidos a intensidades de corrente bastante superiores a sua capacidade em regime permanente, então assiste-se, por efeito da lei de Joule, a um aumento significativo da temperatura da alma condutora, num muito curto espaço de tempo, não permitindo assim a dissipação de calor. Pode-se, no entanto, admitir que a alma condutora seja levada a uma temperatura substancialmente superior aquela que é utilizada em regime permanente, sem prejuízo para o isolante, no entanto as temperaturas máximas admitidas nos isolantes são definidas por fatores em normalização [17].

Segundo as RTIEBT, o tempo de corte da corrente resultante de um curto-circuito que se produza em qualquer ponto do circuito, não deve ser superior ao tempo necessário para elevar a temperatura dos condutores até ao seu limite admissível.

O tempo de atuação das proteções será máximo para os valores de corrente de curto-circuito mínimas (I_K).

O tempo de corte da corrente (t) resultante de um curto-circuito, que se produza em qualquer ponto do circuito, não deve ser superior ao tempo necessário para elevar a temperatura dos condutores até ao seu limite admissível, devendo verificar-se [1]:

$$t \leq \left(\frac{KS}{I_K} \right)^2 \quad (4.34)$$

em que:

t - Tempo de corte para a corrente I_K [s];

K - Constante dada pela Tabela 4.11;

S - Secção dos condutores [mm²];

I_K - Para os condutores ativos corresponde à corrente de curto-circuito mínima, I_{K1min} ou

I_{K2min} - para condutores de proteção ou de PEN corresponde à corrente de defeito I_f [A].

Sendo o valor de K dado por [1]:

	Natureza dos condutores	
	Cobre	Alumínio
Condutores ativos e condutores proteção de que fazem parte da mesma canalização	Valores de <i>K</i>	
Isolados a PVC: ≤300 mm ²	115	76
>300 mm ²	103	68
Isolados PR ou EPR	143	94
Isolados a borracha	134	89
Condutores de proteção separados		
Isolados a PVC: ≤300 mm ²	143	95
>300mm ²	133	88
Isolados PR ou EPR	176	116
Isolados a borracha	166	110

 Tabela 4.11 – Fator *K*.

É necessário, segundo o guia UTE C 15-500, verificar as características térmicas dos condutores quando a secção do condutor de neutro, do PE ou do PEN, é inferior à dos condutores ativos ou quando se o dispositivo de proteção contra sobrecargas não estiver situado na origem da canalização.

Considerando que as RTIEBT impõem que a corrente de curto-circuito mínima assegure o funcionamento dos dispositivos de proteção, é necessário realizar o cálculo da mesma corrente.

4.11.1 CÁLCULO DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO MÍNIMAS

A corrente de curto-circuito mínima é, em regra, a que resulta de um curto-circuito franco no ponto mais afastado da canalização protegida, entre fase e neutro ou entre duas fases, se o neutro não for distribuído [23].

Corrente de curto-circuito mínima bifásica (I_{K2min})

A corrente de curto-circuito mínima bifásica I_{K2min} , em kA, é dada por:

$$I_{K2min} = \frac{C_{min} m \alpha U_0}{2Z} = \frac{C_{min} m \alpha U_0}{2 \sqrt{(R_s + R_u + R_{xph})^2 + (X_s + X_u + X_{ph})^2}} \quad (4.35)$$

sendo:

$$R_{xph} = R_{Cxp} L_{1d} \quad \text{e} \quad X_{ph} = X_C L_{1d} \quad (4.36)$$

em que:

R_{xph} - Resistência para os condutores de fase (ph) considerando a resistividade dos condutores a uma dada temperatura [mΩ].

Corrente de curto-circuito mínima monofásica (I_{K1min})

A corrente de curto-circuito mínima monofásica I_{K1min} , em kA, é dada por:

$$I_{K1min} = \frac{\sqrt{3}C_{min}m\alpha U_0}{\sqrt{(R_s + R_u + R_N + R_{xphN})^2 + (X_s + X_u + X_N + X_{phN})^2}} \quad (4.37)$$

sendo:

$$R_{xphN} = (R_{Cxph} + R_{CxN})L_{1d} \quad e \quad X_{phN} = (X_{Cph} + X_{CN})L_{1d} \quad (4.38)$$

em que:

R_{xphN} - Resistência para os condutores de fase e neutro (ph e N) considerando a resistividade dos condutores a uma dada temperatura [mΩ];

sendo os valores de R_s e X_s dados por:

	R_s	X_s
Transformador Triângulo-Estrela	$R_Q + R_T$	$X_Q + 0,9 \cdot X_T$
Transformador Estrela-Estrela	$R_Q + R_T$	$X_Q + 4 \cdot X_T$
Transformador Estrela-Ziguezague ou Triângulo-Ziguezague	$R_Q + 0,8 \cdot R_T$	$X_Q + 0,8 \cdot X_T$
Alimentação em Baixa tensão	R_Q	X_Q
Gerador	0	$\frac{2 \cdot X'_d + X_0}{3}$

Tabela 4.12 – Valores das impedâncias para o cálculo de correntes mínimas de c.c.

4.12 QUEDAS DE TENSÃO

Um dos parâmetros mais importantes para o correto dimensionamento de uma canalização elétrica é o cálculo da queda de tensão. A queda de tensão pode ser definida como a diferença de tensões entre dois pontos de uma mesma instalação, estando um ponto a jusante de um outro.

Este problema coloca-se essencialmente na Baixa Tensão (BT), já que a queda de tensão pode atingir uma percentagem não desprezável da tensão de alimentação, sendo necessário que a tensão disponível em qualquer ponto da instalação permita um funcionamento satisfatório dos recetores alimentados [17].

A queda de tensão, entre a origem da instalação e qualquer ponto de utilização, expressa em função da tensão nominal da instalação, não deve ser superior aos valores indicados na Tabela 4.13 [1]:

Utilização	Iluminação	Outros Usos
A- Instalações alimentadas diretamente a partir de uma rede de distribuição (pública) em Baixa Tensão.	3%	5%
B- Instalações alimentadas a partir de um Posto de Transformação MT/BT.	6%	8%

Tabela 4.13 – Quedas de tensão máximas admissíveis.

As quedas de tensão u , em V, podem ser determinadas a partir da seguinte expressão [15]:

$$u = b(R_{Iph} \cos\varphi + X_{ph} \sin\varphi) I_B 10^3 \quad (4.39)$$

em que:

$$R_{Iph} = R_{C1ph} L_{Id} \quad e \quad X_{ph} = X_{Cph} L_{Id} \quad (4.40)$$

sendo, em percentagem:

$$\Delta u = 100 \frac{u}{U_0} \quad (4.41)$$

em que:

Δu - Queda de tensão expressa em percentagem [%];

u - Queda de tensão expressa em volts [V];

b - Coeficiente igual a 1 para os circuitos trifásicos e a 2 para os monofásicos (os circuitos trifásicos com o neutro completamente desequilibrado, isto é, com uma só fase carregada, são considerados como sendo monofásicos);

$\cos\varphi$ - Fator de potência apenas para a 1ª harmônica (na falta de elementos mais precisos, pode ser usado o valor $\cos\varphi = 0,8$; ind. e, conseqüentemente, $\sin\varphi = 0,6$);

I_B - Corrente de serviço [A];

U_0 - Tensão entre fase e neutro [V];

R_{1ph} - Resistência linear para os condutores de fase (ph) considerando a resistividade dos condutores à temperatura de funcionamento estável [m Ω];

X_{ph} - Reatância dos condutores de fase (ph) [m Ω], sendo X_C a reatância por unidade de comprimento.

Os limites impostos pela Tabela 4.12 podem ser derogados para os casos de motores durante o período de arranque e para os de outros equipamentos com correntes elevadas, desde que esteja garantido que as variações de tensão permaneçam dentro dos limites especificados pela respectiva Norma desses equipamentos. Podem-se também derogar esses valores para os circuitos de Tensão Reduzida (TR), desde que os aparelhos possam funcionar corretamente em estaleiros e instalações para trabalhos [1].

É importante referir que a expressão (4.39) é aproximada, pois considera a soma aritmética da parte resistiva e da parte indutiva, quando idealmente se deveria considerar a soma vetorial; no entanto, atendendo aos valores de $\cos\varphi$, a tender cada vez mais para um valor próximo da unidade, pode considerar-se este método aceitável [24].

Constatar-se-á também que a fórmula (4.39) não considera os valores de distorção harmônica, que se tornam cada vez mais significativos com a utilização cada vez mais massiva dos equipamentos de eletrônica de potência. Deve então, sempre que for previsível, na ocorrência de distorções harmônicas relevantes, considerar-se o coeficiente b igual a 2 também nos circuitos trifásicos e efetuar a correção do valor de I_B [1].

5. ANÁLISE DE ALGUNS PARÂMETROS DO DIMENSIONAMENTO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

5.1 DETERMINAÇÃO DA SECÇÃO ECONÓMICA

No cálculo da secção dos condutores a instalar numa instalação elétrica de BT é de carácter obrigatório o cumprimento de várias regras técnicas, resultando daí uma secção técnica mínima. No entanto, por múltiplos fatores, é recomendável, em certos casos, considerar maiores secções por motivos económicos, realizando-se os cálculos necessários.

Uma das razões que poderá ser determinante para a escolha de uma maior secção de condutores, poderá estar relacionada com a simplificação da gestão de stocks e facilidade de execução do projeto, permitindo assim a existência de menor número de secções implementadas em obra.

Outra razão que poderá levar a um incremento da secção técnica dos condutores é a consideração de fatores económicos.

Considerando que os custos de implementação de uma instalação elétrica compreendem os custos de obtenção e instalação dos equipamentos, ponderando, neste caso, condutores, cabos e aparelhagem adjacente, tal como a de suporte e proteção, e que irá funcionar durante um determinado período de tempo, em que ocorrem perdas por efeito por efeito de Joule, custeadas pela entidade responsável pela exploração da instalação, devem considerar-se duas parcelas distintas [25]:

- A primeira parcela está associada a custos de investimento, nomeadamente em cabos. Este custo revela-se, por razões facilmente compreensíveis, crescente com o aumento da secção dos condutores;
- A segunda parcela resulta de custos de exploração, nomeadamente associados ao custo das perdas por efeito de Joule. O custo das perdas por efeito de Joule depende da resistência dos condutores, pelo que esta parcela é decrescente com o aumento da secção.

Partindo desta análise, é possível representar os custos totais suportados pela entidade responsável pela exploração da instalação, considerando os custos totais em função do investimento inicial e da secção [17]:

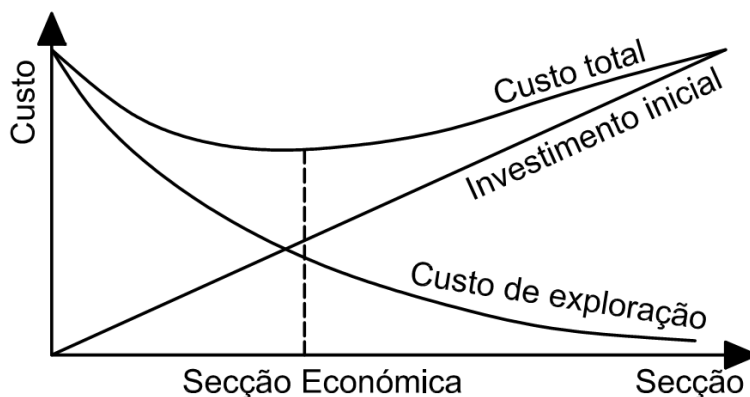


Figura 5.1 – Relação entre a secção e custo de um condutor.

Pode verificar-se facilmente a variação do custo total em função das variáveis, verificando-se a existência num determinado ponto de um compromisso entre a secção e o custo inicial, que resulta num menor custo total, dando-se a essa secção a designação de secção económica.

Por vezes é requerida por imposição do dono de obra que apenas seja considerada a primeira parcela referente ao custo inicial, com o objetivo de minimizá-lo por razões de indisponibilidade de capital, ou pelo desinteresse na eficiência energética quando a instalação em causa é destinada à exploração por entidades distintas do dono da obra. Devem, no entanto, ser estudadas as contrapartidas a curto e a longo prazo da utilização de um valor mais próximo do valor correspondente à secção económica.

5.1.1 CÁLCULO DA SECÇÃO ECONÓMICA

A elaboração minuciosa do cálculo exato da secção mais económica é relativamente complexa, considerando valores muitas vezes imprevisíveis no momento da execução do projeto, tais como a evolução do custo da energia elétrica, a intensidade média de corrente a transmitir ou até o custo dos condutores ao dono de obra, sendo portanto bastante aceitável a utilização de uma forma de cálculo aproximada [17]:

$$S_0 = KI\sqrt{hpA} \quad (5.1)$$

sendo:

$$A = \frac{(1+t)^N - 1}{t(1+t)^N} \quad (5.2)$$

em que:

K - Constante que toma o valor de $K = 4,61 \cdot 10^{-2}$ para condutores em alumínio ou

$K = 2,56 \cdot 10^{-2}$ para condutores de cobre;

S_0 - Secção económica [mm^2];

I - Intensidade média a transmitir [A];

h - Número de horas de serviço da canalização por ano [horas];

p - Preço da energia eléctrica [€/kWh];

t - Taxa de anual de amortização [$0 < t < 1$];

A - Anuidades [anos];

N - Prazo de amortização previsto para o equipamento [anos].

Do cálculo do valor da secção económica resulta geralmente um resultado superior ao dado pela secção técnica mínima, existindo algumas vantagens e desvantagens na sua utilização.

Vantagens:

- Menores custos a longo prazo;
- Maior vida útil por parte das canalizações por estas estarem sujeitas a um menor aquecimento;
- Queda de tensão menor, o que apresenta um interesse particular para os binários dos motores no arranque que são proporcionais ao quadrado de tensão [17];
- Em certos casos, possibilidade de expansão futura da instalação sem alteração dos condutores.

Desvantagens:

- Maiores correntes de curto-circuito máximas, o que poderá levar a custos mais onerosos na aquisição de aparelhagem eléctrica;
- Maiores custos nas infraestruturas e na instalação.

5.2 ESCOLHA DO MATERIAL DA ALMA CONDUTORA

A escolha criteriosa do material da alma do condutor não deve ser negligenciada.

O cobre e o alumínio são os materiais utilizados desde os primórdios das Instalações Elétricas, devido às suas propriedades mecânicas, elétricas e térmicas, tendo em conta o seu custo.

Devido ao aumento do preço do cobre e do conseqüente aumento dos furtos de condutores com alma em cobre, tem existido uma maior aplicação de condutores com alma em alumínio.

Convém, no entanto, referir que a ponderação entre a utilização do cobre e a do alumínio como alma condutora dos condutores e cabos, deverá ser realizada considerando não apenas o custo inicial dos mesmos, mas também outros aspetos relevantes como a secção elétrica equivalente, o peso, a intensidade máxima admissível dos mesmos e as perdas de energia [26].

Peso e condutividade

O peso e a condutividade dos condutores são características condicionantes à escolha do material da alma condutora.

Estabelecendo a relação entre a resistividade do cobre e a do alumínio, a partir da Tabela 4.1, verifica-se:

$$\frac{\rho_{0\text{Alumínio}}}{\rho_{0\text{Cobre}}} = 1,6 \quad (5.3)$$

Após a análise da relação entre a resistividade dos materiais em questão, pode-se concluir, considerando a expressão (4.2), que um condutor de alumínio terá de ter uma secção de aproximadamente 60% superior ao condutor de cobre para assumir a mesma resistência elétrica, ou seja, ter uma capacidade de condução equivalente.

Analisando a densidade do cobre face ao alumínio (*Dens.*):

$$\frac{\frac{\rho_{0\text{Alumínio}}}{\rho_{0\text{Cobre}}} \text{Dens. Alumínio}}{\text{Dens. Cobre}} = 0,5 \quad (5.4)$$

Pode-se verificar que apesar do condutor de alumínio necessitar de uma secção 60% superior ao condutor de cobre para assumir a mesma capacidade de condução, verifica-se que o mesmo terá apenas aproximadamente metade do peso.

Partindo das relações apresentadas anteriormente, pode-se facilmente confirmar os critérios clássicos de seleção da alma condutora, ou seja, alumínio nas aplicações onde o peso dos condutores seja relevante, e cobre onde seja preferível utilizar baixas secções condutoras, e seja necessário realizar bastantes conexões.

É comum a utilização de condutores em alumínio em linhas aéreas, pois a rigidez estrutural dos apoios e dos equipamentos de suporte, assim como o comprimento dos vãos, estão profundamente relacionados com o peso dos condutores a utilizar, e de cobre nas Instalações Elétricas de BT em edifícios.

Conexões entre condutores

As instalações, onde são utilizados condutores de alumínio, apresentam algumas características próprias no que se refere às conexões devido às suas propriedades físicas. O alumínio, quando fica sujeito ao meio ambiente, forma uma fina película de óxidos que atua como camada protetora contra a corrosão, no entanto esta película têm propriedades isolantes.

Para realizar conexões entre condutores de alumínio é necessário romper a camada de óxidos entre eles através de conectores que garantam a aplicação de pressão suficiente e de compostos químicos que impeçam a formação de novas camadas de óxido.

As conexões realizadas entre condutores de cobre podem ser realizadas diretamente, não sendo exigidas condições especiais.

Quando é realizada a conexão entre condutores de alumínio e cobre, é necessária a utilização de terminais bimetálicos devido às ações corrosivas (diferentes potenciais eletroquímicos, sendo os valores iguais a: - 1,70 V para o alumínio e + 0,34 V para o cobre) que existem quando estes dois diferentes materiais se encontram diretamente em contacto.

5.3 PERTURBAÇÕES HARMÔNICAS EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

5.3.1 INTRODUÇÃO

Até ao início dos anos 90 as Instalações Elétricas de BT eram responsáveis pela alimentação predominante de cargas de lineares, ou seja cargas constituídas por elementos resistivos, indutivos ou capacitivos. Neste caso, as correntes associadas às cargas lineares têm uma relação de proporcionalidade com as tensões que lhes são aplicadas, ainda que possa existir um desfasamento entre as mesmas ($\varphi \neq 0$; φ - ângulo de desfasagem entre a tensão e a respectiva corrente) [27].

O desenvolvimento da eletrônica de potência e o conseqüente crescimento da utilização de equipamentos eletrônicos constituídos por cargas não lineares, alimentados pelas Instalações Elétricas, veio afetar a qualidade de energia elétrica no que respeita à deformação das formas de onda (poluição harmónica). Quando existe deformação da onda de tensão ou de corrente, significa que a distribuição de energia elétrica é perturbada e que a Qualidade de Energia não é ótima [28].

Assim, apesar das virtudes dos equipamentos eletrônicos, nomeadamente no aumento da produtividade e no campo da eficiência energética, que trouxeram um novo paradigma ao projeto e dimensionamento de Instalações Elétricas de BT, o que implica que os projetistas de Instalações Elétricas tenham cada vez mais a ter em conta a temática da poluição harmónica nas instalações.

O objetivo deste capítulo é definir e apresentar a origem das harmónicas, apresentar os seus efeitos nefastos nas Instalações Elétricas e, por fim, apresentar algumas soluções para esta problemática.

5.3.2 DEFINIÇÃO

As harmónicas de tensão e/ou de corrente, por vezes para além da componente contínua, podem ser definidas como componentes de uma onda periódica, cujas frequências são múltiplas inteiras da frequência fundamental do sinal de alimentação [29].

Assim, pode-se afirmar que um sinal periódico tem harmónicas quando não é representado por uma única sinusóide perfeita (1ª harmónica), sendo o resultado obtido pelo somatório da onda fundamental (com a frequência do sinal de alimentação), com as

harmônicas de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental do sinal de alimentação.

5.3.3 ANÁLISE E DEFINIÇÃO DOS INDICADORES QUANTITATIVOS DAS HARMÔNICAS

É necessário ter em conta vários indicadores para que se possa fazer uma análise do conteúdo harmónico de uma onda.

Para compreender o conteúdo harmónico de uma dada onda, é necessário compreender e ter em conta o desenvolvimento em séries de Fourier, em que todas as funções periódicas não sinusoidais podem ser representadas pela soma das seguintes componentes:

- Termo sinusoidal à frequência fundamental (50 Hz);
- Os termos harmónicos com frequências múltiplas inteiras do termo fundamental;
- Uma componente contínua (valor médio da função).

Assim, das séries de Fourier, é possível analisar formas de onda com conteúdo harmónico.

Valor eficaz e distorção harmónica das tensões:

O valor instantâneo de uma dada tensão total aplicada $u(t)$, com componente harmónica é, por intermédio de séries de Fourier, dada por [39]:

$$u(t) = u_0 + \sum_{k=1}^{\infty} u_k(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{M,k} \sin(k \omega t + \alpha_k) \quad (5.5)$$

em que:

$u_0 \equiv U_0$ - Componente contínua da tensão (ou valor eficaz), se houver [V];

$u_k(t) \equiv u_k(\theta)$ - Tensão instantânea da harmónica de índice k ($k = 1; 2; \dots; \infty$) [V];

$u(t) \equiv u(\theta)$ - Tensão total aplicada [V];

$U_{M,k}$ - Valor máximo da tensão da harmónica de índice k [V];

α_k - Ângulo de fase da tensão em relação à origem dos tempos, para cada harmónica de índice $k \geq 1$ [° ou rad];

$\omega t \equiv \theta$ - Ângulo de fase no instante t , para a 1ª harmónica ($k = 1$), não considerando a defasagem inicial [° ou rad];

k - Índice harmónico.

Sendo o valor eficaz da tensão total, U em V , dado por:

$$U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [u_0 + \sum_{k=1}^{\infty} u_k(t)]^2 d\theta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{M,k} \sin(k\theta + \alpha_k)]^2 d\theta} \quad (5.6)$$

ou seja, o valor eficaz da tensão total a partir da tensão da harmónica de índice k , será [39]:

$$U = \sqrt{U_0^2 + \int_0^{2\pi} \sum_{k=1}^{\infty} U_{M,k} \sin(k\theta + \alpha_k)]^2 d\theta} = \sqrt{U_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k^2} \quad (5.7)$$

ou ainda:

Caso haja também componente contínua:

$$U = U_0 \sqrt{1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{U_k}{U_0}\right)^2} \quad (5.8)$$

Caso só exista componentes harmónicas:

$$U = U_1 \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2} \quad (5.9)$$

No caso de não existir 1ª harmónica:

$$U = U_2 \sqrt{1 + \sum_{k=3}^{\infty} \left(\frac{U_k}{U_2}\right)^2} \quad (5.10)$$

em que:

U - Valor eficaz da tensão total aplicada [V];

U_k - Valor eficaz da tensão da harmónica de índice $k \geq 1$ [V].

O indicador mais amplamente utilizado para determinar a distorção harmónica é a taxa de distorção harmónica total (TDH_t ou TDH_i). Este indicador representa a distorção de onda devida a todas as harmónicas presentes num dado sinal periódico.

Podendo-se definir Taxa de Distorção Harmónica da tensão (TDH_U ou TDH_U), relativamente à 1ª harmónica (U_1), por:

$$TDH_U = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2} \quad (5.11)$$

Podendo-se escrever no caso da não existência de componente contínua:

$$U = U_1 \sqrt{1 + (\text{TDH}_U)^2} \quad (5.12)$$

em que:

U - Valor eficaz da tensão total aplicada [V];

U_1 - Valor eficaz da 1ª harmónica da tensão [V];

U_k - Valor eficaz da tensão da harmónica de índice $k \geq 1$ [V];

TDH_U - Taxa de distorção de distorção harmónica da tensão.

Valor eficaz distorção harmónica das correntes:

O valor instantâneo de uma dada corrente com componente harmónica é, através da análise de Fourier, dada por [38]:

$$i(t) = i_0 + \sum_{k=1}^{\infty} i_k(t) = i_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{M,k} \sin(k\omega t + \alpha_k - \varphi_k) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_{M,k}}{Z_k} \sin(k\theta + \alpha_k - \varphi_k) \quad (5.13)$$

em que:

$i_0 \equiv I_0 = \frac{u_0}{R}$ - componente contínua da corrente (ou valor eficaz), se houver [A];

R - resistência da carga [Ω];

Z_k - Impedância da carga correspondente à harmónica de índice k [Ω];

$i_k(t) \equiv i_k(\theta)$ - Corrente instantânea da harmónica de índice k ($k = 1; 2; \dots; \infty$) [A];

$i(t) \equiv i(\theta)$ - Corrente total instantânea [A];

$I_{M,k}$ - Valor máximo da corrente da harmónica de índice k [A];

φ_k - Ângulo de defasagem da corrente em relação à respetiva tensão, para cada harmónica de índice k [$^\circ$ ou rad].

Sendo o valor eficaz da corrente total dado por:

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [i_0 + \sum_{k=1}^{\infty} i_k(t)]^2 d\theta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{M,k} \sin(k\theta + \alpha_k + \varphi_k)]^2 d\theta} \quad (5.14)$$

ou seja, o valor eficaz da corrente da harmónica de índice k (I_k em [A]), será:

$$I_k = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [I_{M,k} \sin(k\theta + \alpha_k + \varphi_k)]^2 d\theta} \quad (5.15)$$

ou ainda, de (5.14):

Caso exista também componente contínua:

$$I = I_0 \sqrt{1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{I_k}{I_0}\right)^2} \quad (5.16)$$

Caso só exista componentes harmónicas:

$$I = I_1 \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{I_k}{I_1}\right)^2} \quad (5.17)$$

em que:

I - Valor eficaz da corrente total [A];

I_1 - Valor eficaz da corrente da 1ª harmónica [A];

I_k - Valor eficaz da corrente da harmónica de índice k [A];

Podendo-se definir Taxa de Distorção Harmónica da Corrente (TDH_I), relativamente à 1ª harmónica, por:

$$TDH_I = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{I_k}{I_1}\right)^2} \quad (5.18)$$

Podendo-se escrever no caso da não existência de componente contínua:

$$I = I_1 \sqrt{1 + (TDH_I)^2} \quad (5.19)$$

em que:

TDH_I ou $TDHI$ - Taxa de distorção harmónica da corrente.

Potência ativa, aparente e taxa de distorção harmónica da potência:

Sendo o valor instantâneo da potência total $p_t(t)$, em W ou pu, dado por:

$$\begin{aligned} p_t(t) &= u(t)i(t) = \left[u_0 + \sum_{k=1}^{\infty} u_k(t) \right] \left[i_0 + \sum_{k=1}^{\infty} i_k(t) \right] = \\ &= \left[u_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{M,k} \sin(k\theta + \alpha_k) \right] \left[i_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_{M,k}}{Z_k} \sin(k\theta + \alpha_k - \varphi_k) \right] \end{aligned} \quad (5.20)$$

o valor da potência total aparente S_t , em VA ou pu, será dado por:

Caso exista também componente contínua:

$$St = UI = U_0 I_0 \sqrt{1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{U_k}{U_0}\right)^2} \sqrt{1 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{I_k}{I_0}\right)^2} \quad (5.21)$$

Caso só exista componentes harmónicas:

$$St = UI = U_1 I_1 \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{I_k}{I_1}\right)^2} = U_1 I_1 \sqrt{1 + TDH_U^2} \sqrt{1 + TDH_I^2} \quad (5.22)$$

Tendo-se a potência ativa média total (Pt em W ou pu), dada por:

$$\begin{aligned} Pt \equiv Pt_{\text{méd}} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_t(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p_t(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\theta) i(\theta) d\theta = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[u_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{M,k} \sin(k\theta + \alpha_k) \right] \left[i_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_{M,k} \sin(k\theta + \alpha_k - \varphi_k) \right] d\theta \end{aligned} \quad (5.23)$$

ou seja:

$$\begin{aligned} Pt &= U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_{M,k} I_{M,k}}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin(k\theta + \alpha_k) \sin(k\theta + \alpha_k - \varphi_k) d\theta = \\ &= U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_k I_k}{2\pi} \left[\theta \cos \varphi_k - \frac{\sin(2k\theta + 2\alpha_k - \varphi_k)}{2k} \right]_0^{2\pi} \end{aligned} \quad (5.24)$$

ou ainda:

$$Pt = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k \quad (5.25)$$

Podendo-se portanto escrever:

$$Pt = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + \sum_{k=2}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 \left(1 + \sum_{k=2}^{\infty} \frac{U_k I_k \cos \varphi_k}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} \right) \quad (5.26)$$

Definindo-se a Taxa de Distorção Harmónica da Potência (TDHP ou TDHP), por:

$$TDHP = \sum_{k=2}^{\infty} \frac{U_k I_k \cos \varphi_k}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} \quad (5.27)$$

Sendo portanto:

$$Pt = \sum_{k=0}^{\infty} P_k = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 (1 + TDHP) \quad (5.28)$$

De (5.25), dado que na componente contínua Q_0 é sempre nula, a potência reativa (Q_t em VAR ou pu), é dada por:

$$Q_t = \sum_{k=0}^{\infty} Q_k = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k \quad (5.29)$$

5.3.4 ORIGEM E CLASSIFICAÇÃO DAS HARMÔNICAS

As harmônicas são fundamentalmente causadas pela alimentação de cargas não lineares, em que a relação entre corrente e a tensão não pode ser descrita por uma equação linear.

A utilização de dispositivos com eletrônica de potência é a principal fonte de cargas não lineares nas Instalações Elétricas. Estima-se que atualmente cerca de 50% da energia elétrica seja processada por dispositivos de eletrônica de potência [29].

Os dispositivos eletrônicos de potência são geralmente constituídos por semicondutores, trabalhando em modo de condução ou de corte, provocando a circulação de correntes de onda não sinusoidal pura. Estes dispositivos são responsáveis pela criação de harmônicas com características bem definidas, ou seja, com formas de onda periódicas e com uma frequência múltipla da fundamental, em que é possível conhecer as suas características a partir das cargas alimentadas.

Outra fonte de cargas não lineares nas Instalações Elétricas são os equipamentos cujo princípio de funcionamento é baseado no arco elétrico, como o caso de máquinas de soldar, fornos de arco ou lâmpadas de descarga, geradores de harmônicas cujas características dependem de fenómenos aleatórios, não tendo portanto uma relação direta com as características da alimentação da carga, e não tendo periodicidades nem frequências bem definidas.

5.3.5 CARGAS NÃO LINEARES TÍPICAS

É essencial conhecer quais são as principais cargas não lineares responsáveis pelo conteúdo harmónico das instalações, sendo igualmente importante conhecer o tipo e conteúdo harmónico provocado por cada tipo de carga não linear, nomeadamente os múltiplos harmónicos mais relevantes.

Sistemas de retificação

Para realizar a retificação de uma corrente alternada através de um retificador de eletrônica de potência, é necessário explorar as características de semicondutores tais como díodos e tirístores que apenas permitem a condução de corrente elétrica num único sentido e que, associados com condensadores e bobinas, permitem a conversão de corrente alternada em corrente contínua. Verifica-se, no entanto, que os “cortes” feitos pelos dispositivos condutores fazem com que a onda de corrente que alimenta o retificador de rede seja distinta de uma sinusóide pura, e portanto com uma forte componente harmônica.

É possível conhecer a frequência, em Hz, das correntes harmônicas mais relevantes através da aplicação da seguinte expressão [27]:

$$\text{frequência} = (nK + 1) f \quad (5.30)$$

em que:

K - Número de pulsos do retificador [adimensional];

n - Número natural [adimensional];

f - frequência [Hz].

Fontes de alimentação monofásicas

As fontes de alimentação monofásicas com princípio de funcionamento baseado em eletrônica de potência, compostas por pontes retificadoras de onda completa, estão disseminadas nas Instalações Elétricas [29].

Estes aparelhos têm como desvantagem de apenas permitir que a corrente flua em pulsos de curta duração, fazendo com que a onda da corrente de alimentação destas fontes tenha uma forte componente harmônica, nomeadamente a 3ª e as demais harmônicas ímpares [27].

A presença dominante da 3ª harmônica nas instalações responsáveis pela alimentação de fontes de alimentação monofásicas trás uma problemática associada, pois estas são somadas no condutor de neutro das instalações trifásicas, havendo portanto necessidade de sobredimensionar o condutor de neutro. Este aspeto será abordado adiante no ponto 5.3.7.

Dispositivos com princípio de funcionamento baseado no arco elétrico

Os dispositivos com princípio de funcionamento baseado no arco elétrico são considerados não lineares devido às características das ondas de corrente que os alimentam. Um arco elétrico tem geralmente um comportamento não previsível [29].

Enumeram-se adiante alguns aparelhos com o princípio de funcionamento em causa [30]:

- Lâmpadas de descarga;
- Fornos elétricos de arco;
- Equipamentos de solda a arco;
- Certos equipamentos industriais.

Dispositivos magnéticos em regime de funcionamento saturado

Certos equipamentos com princípio de funcionamento magnéticos, tais como motores e transformadores com núcleos laminados, quando sujeitos à sobre-excitação, revelam um comportamento não linear [27]. Este fenómeno acontece devido à incapacidade de variação linear entre fluxo magnético do núcleo de aço e a tensão aplicada, provocando assim a distorção das ondas de corrente no primário, e de tensão no secundário com predominância das harmónicas múltiplas de 3.

A título de exemplo demonstrativo, considera-se a determinação da corrente absorvida por um transformador de potência trifásico a funcionar na zona de saturação, em que a presença da 3ª harmónica é de 10% (segundo a Norma não deve ser superior a 5%) alimentando uma carga RL série ($\cos\varphi \equiv \cos\varphi_1 = 0,8; \text{ind.}$), de impedância unitária (100%).

Assim, considerando as tensões da harmónica fundamental (1ª harmónica) dadas por:

$$\begin{bmatrix} u_{1_1} \\ u_{2_1} \\ u_{3_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{M,1} \sin(\theta + \alpha_1) \\ U_{M,1} \sin(\theta + \alpha_1 - \frac{2\pi}{3}) \\ U_{M,1} \sin(\theta + \alpha_1 - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix}; \quad un_1 = u_{1_1} + u_{2_1} + u_{3_1} = 0; \quad \alpha_1 = 0 \quad (5.31)$$

Considerando o sistema trifásico equilibrado, em que $U_{M,1} = 1 \text{ pu}$, $\alpha_1 = 0$, e que a tensão u_{1_1} está em fase com a origem dos tempos ($\alpha_1 = 0$).

E sendo as tensões das 3ªs harmónicas dadas por:

$$\begin{bmatrix} u_{1_3} \\ u_{2_3} \\ u_{3_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{M,3} \sin(3\theta + \alpha_3) \\ U_{M,3} \sin[3(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \alpha_3] \\ U_{M,3} \sin[3(\theta - \frac{4\pi}{3}) + \alpha_3] \end{bmatrix}; \quad un_3 = u_{1_3} + u_{2_3} + u_{3_3} = 3u_{1_3} \quad (5.32)$$

Considerando o sistema trifásico equilibrado, em que $U_{M,3} = 0,1$ pu; $\alpha_3 = 0$, e que a tensão u_{13} está em fase com a origem dos tempos ($\alpha_3 = 0$).

Em que:

u_{11} ; u_{21} e u_{31} - tensões simples instantâneas de uma fonte trifásica (1ª harmónica) [V];

u_{13} ; u_{23} e u_{33} - tensões simples instantâneas de uma fonte trifásica (3ª harmónica) [V];

u_{n1} - tensão no neutro devido às 1ªs harmónicas das tensões [V];

u_{n3} - tensão no neutro devido às 3ªs harmónicas das tensões [V];

$U_{M,1}$ - tensão máxima correspondente à 1ª harmónica [V];

$U_{M,3}$ - tensão máxima correspondente à 3ª harmónica [V];

α_1 - ângulo de fase na origem dos tempos da tensão u_{11} [° ou rad];

α_3 - ângulo de fase na origem dos tempos da tensão u_{13} [° ou rad];

$\theta = \omega t$ - posição angular no instante t [rad].

Tem-se uma representação gráfica considerando um diagrama cartesiano, em V ou pu, de tensões: 1ª e 3ª harmónicas (10%), total e de neutro (3ª harmónica); no caso de um transformador monofásico a funcionar na zona de saturação (ex.: corrente de magnetização) (ver Fig. 5.2).

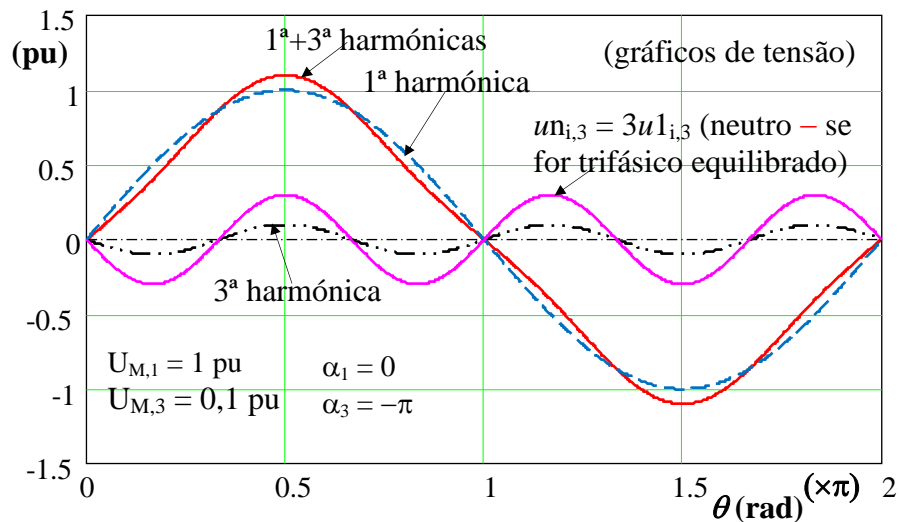


Figura 5.2 – Diagrama cartesiano de tensões 1ª e 3ª harmónicas ($\alpha_1 = 0$ e $\alpha_3 = -\pi$).

No caso de um transformador monofásico a funcionar na zona de saturação (ex.: tensão no secundário) (ver Fig. 5.3).

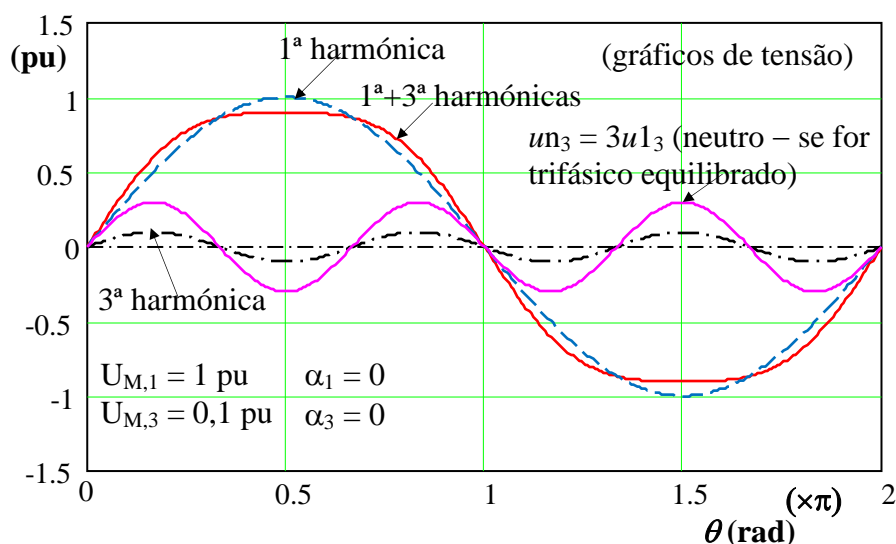


Figura 5.3 – Diagrama cartesiano de tensões 1ª e 3ª harmônicas ($\alpha_1 = 0$ e $\alpha_3 = 0$).

Assim, como exemplo, considerando uma carga RL série (R - resistência em Ω , e L - coeficiente de indução em H), em que $\omega = 100\pi$ rad ($f \equiv f_1 = 50$ Hz - 1ª harmônica):

$$\begin{bmatrix} R \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,8 \Omega \\ \frac{0,6}{\omega} \text{ H} \end{bmatrix} \quad (\text{para a } 1^\text{a} \text{ harmônica}) \quad (5.33)$$

Assim se for considerado um intervalo compreendido entre 0 e 2π , para um número N de pontos, em que: $\theta_i = 2\pi \frac{i}{N}$ ($i = 0; 1; \dots; N$), a corrente relativa à fase L_1 (ou R), virá:

$$\begin{cases} i_{i,1} \equiv i_{i,1} = \frac{U_{M,1} \sin(\theta_i + \alpha_1 - \varphi_1)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} & (1^\text{a} \text{ harmônica}) \\ i_{i,3} = \frac{U_{M,3} \sin(3\theta_i + \alpha_3 - \varphi_3)}{\sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}} & (3^\text{a} \text{ harmônica}) \end{cases} \quad (5.34)$$

em que:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \text{atan} \frac{\omega L}{R} = \text{acos} \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} & (1^\text{a} \text{ harmônica}) \\ \varphi_3 = \text{atan} \frac{3\omega L}{R} = \text{acos} \frac{R}{\sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}} & (3^\text{a} \text{ harmônica - Fig. 5.4}) \end{cases} \quad (5.35)$$

sendo:

$\varphi_1; \varphi_3$ - ângulos de defasagem entre as tensões e as respectivas correntes, para cada harmônica [rad].

Assim, para os dados da expressão (5.33), a Fig. 5.4 apresenta a representação gráfica do diagrama cartesiano, em pu, da tensão total, e das correntes de 1ª e 3ª harmônicas, total e de neutro (3ª harmónica), para $\alpha_1 = 0$ e $\alpha_3 = -\pi$.

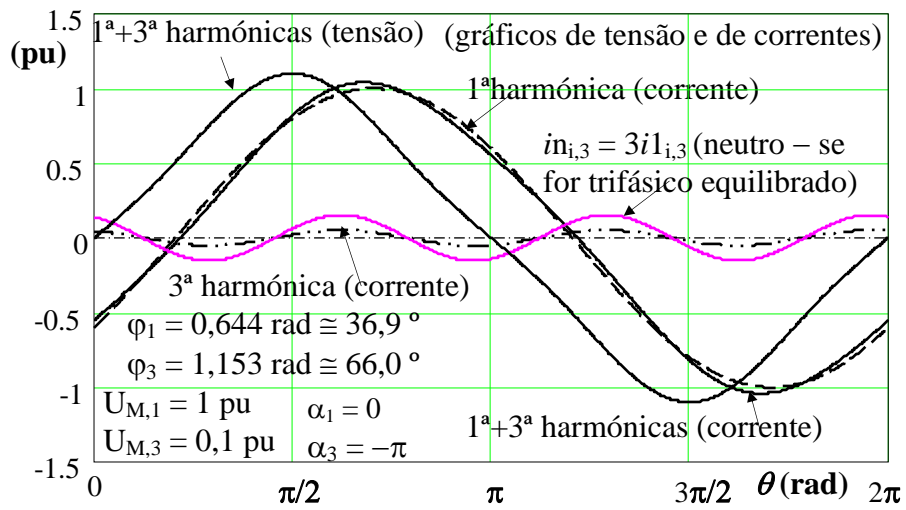


Figura 5.4 – Diagrama cartesiano de tensão e correntes harmônicas ($\alpha_1 = 0$ e $\alpha_3 = -\pi$).

Também para os dados da expressão (5.33), a Fig. 5.5 apresenta a representação gráfica do diagrama cartesiano, em pu, da tensão total, e das correntes de 1ª e 3ª harmônicas, total e de neutro (3ª harmónica), para $\alpha_1 = 0$ e $\alpha_3 = 0$.

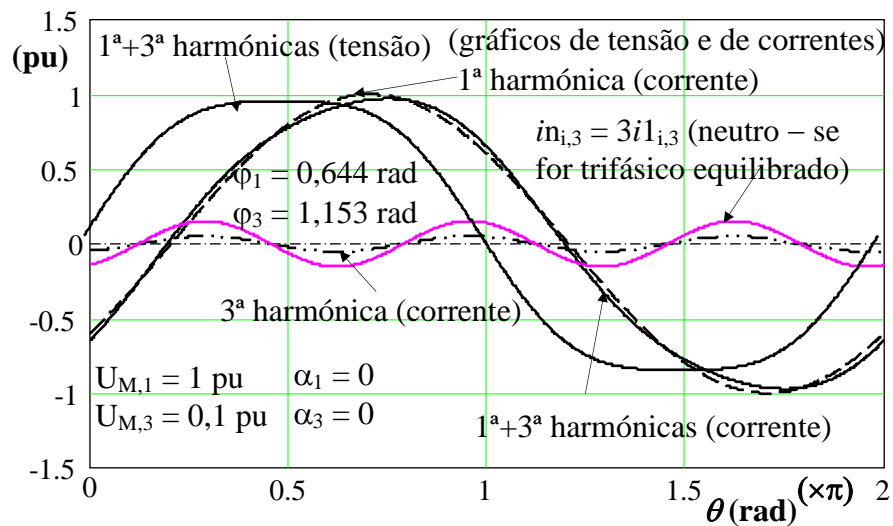


Figura 5.5 – Diagrama cartesiano de tensão e correntes harmônicas ($\alpha_1 = 0$ e $\alpha_3 = 0$).

Perante os dados, para o circuito RL série, a tensão e as correntes eficazes (U em V ou pu, e I em A ou pu), considerando apenas as 1ª e 3ª harmônicas da tensão, serão:

$$\left\{ \begin{aligned} U &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \{ [U_{M,1} \sin(\theta + \alpha_1)]^2 + [U_{M,3} \sin(3\theta + \alpha_3)]^2 \} d\theta} \\ I &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \left[\frac{U_{M,1} \sin(\theta + \alpha_1 - \text{atan} \frac{\omega L}{R})}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \right]^2 + \left[\frac{U_{M,3} \sin(3\theta + \alpha_3 - \text{atan} \frac{3\omega L}{R})}{\sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}} \right]^2 \right\} d\theta} \end{aligned} \right. \quad (5.36)$$

ou, para $\alpha_1 = \alpha_3 = 0$, por substituição (ver Fig. 5.5):

$$\left\{ \begin{aligned} U &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \{ [U_{M,1} \sin \theta]^2 + [U_{M,3} \sin(3\theta)]^2 \} d\theta} = 0,711 \text{ pu} \\ I &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \left[\frac{U_{M,1} \sin(\theta - \text{atan} \frac{\omega L}{R})}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \right]^2 + \left[\frac{U_{M,3} \sin(3\theta - \text{atan} \frac{3\omega L}{R})}{\sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}} \right]^2 \right\} d\theta} = 0,708 \text{ pu} \end{aligned} \right. \quad (5.37)$$

ou ainda:

$$\left\{ \begin{aligned} U &= \frac{U_{M,1}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{U_{M,3}}{U_{M,1}}\right)^2} = U_1 \sqrt{1 + \left(\frac{U_3}{U_1}\right)^2} = 0,711 \text{ pu} \\ I &= \frac{I_{M,1}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \left(\frac{I_{M,3}}{I_{M,1}}\right)^2} = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{I_3}{I_1}\right)^2} = 0,708 \text{ pu} \end{aligned} \right. \quad (5.38)$$

sendo a potência aparente total Stc (em pu ou VA), com distorção harmónica, dada por:

$$Stc = UI = 0,711 \cdot 0,708 = 0,503 \text{ pu} \quad (5.39)$$

Sendo os valores eficazes das tensões: $U_1 = \frac{U_{M,1}}{\sqrt{2}} = 0,707 \text{ pu}$ e $U_3 = \frac{U_{M,3}}{\sqrt{2}} = 0,0707 \text{ pu}$,

em que as potências instantâneas $p1$ – 1ª harmónica e $p3$ – 3ª harmónica (em pu ou W), as potências médias $P1$ e $P3$ (em pu ou W), e as potências reativas $Q1$ e $Q3$ (em pu ou VAR), da 1ª e 3ª harmónicas, para $\alpha_1 = 0$, para $\theta = \omega t$ variável, são dadas por:

$$p1_i = \frac{U_1^2 (1 - \cos 2\theta_i) \cos \phi_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} - \frac{U_1^2 \sin 2\theta_i \sin \phi_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \Rightarrow P1 = \frac{U_1^2 \cos \phi_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{RU_1^2}{R^2 + (\omega L)^2} \quad (5.40)$$

$$[\text{ou: } P1 = \frac{U_{M,1}^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin \theta \sin(\theta - \phi_1)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} d\theta] \text{ e } Q1 = \frac{U_1^2 \sin \phi_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{\omega LU_1^2}{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$p_{3_i} = \frac{U_3^2 [1 - \cos 2(3\theta_i + \alpha_3)] \cos \varphi_3}{\sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}} - \frac{U_3^2 \sin 2(3\theta_i + \alpha_3) \sin \varphi_3}{\sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}} \Rightarrow P_3 = \frac{U_3^2 \cos \varphi_3}{\sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}} =$$

$$= \frac{U_3^2 R}{R^2 + (3\omega L)^2} \quad \left\{ \text{ou : } P_3 = \frac{U_{M,3}^2}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin 3(\theta + \alpha_3) \sin [3(\theta + \alpha_3) - \varphi_3]}{\sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}} d\theta \right\} \quad \text{e} \quad (5.41)$$

$$Q_3 = \frac{U_3^2 \sin \varphi_3}{\sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}} = \frac{\omega L U_3^2}{R^2 + (3\omega L)^2}$$

sendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = \frac{U_1^2 \cos \varphi_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = 0,4 \text{ pu} \\ Q_1 = \frac{U_1^2 \sin \varphi_1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = 0,3 \text{ pu} \end{array} \right. \quad \text{e} \quad \left\{ \begin{array}{l} P_3 = \frac{U_3^2 \cos \varphi_3}{\sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}} = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ pu} \\ Q_3 = \frac{U_3^2 \sin \varphi_3}{\sqrt{R^2 + (3\omega L)^2}} = 2,32 \cdot 10^{-3} \text{ pu} \end{array} \right. \quad (5.42)$$

em que, potência total sem distorção harmônica, St em pu ou VA, será:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_t = P_1 + P_3 \cong 0,401 \text{ pu} \\ Q_t = Q_1 + Q_3 \cong 0,302 \text{ pu} \end{array} \right. \Rightarrow St = \sqrt{P_t^2 + Q_t^2} = 0,502 \text{ pu} \quad (5.43)$$

sendo a potência deformante, Dt em pu ou VAr, dada por:

$$Dt = \sqrt{Stc^2 - P_t^2 - Q_t^2} = 0,030 \text{ pu} \quad (5.44)$$

O fator de potência total com distorção harmônica, $\cos \varphi_{tc}$, será:

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos \varphi_t = \frac{P_t}{St} = 0,799; \text{ ind.} \\ \cos \gamma_t = \frac{St}{Stc} = 0,998; \text{ ind.} \\ \cos \varphi_{tc} = \frac{P_t}{Stc} = \frac{P_t}{St} \frac{St}{Stc} = \cos \varphi_t \cos \gamma_t = 0,797; \text{ ind.} \end{array} \right. \quad (5.45)$$

em que:

Pt - Potência ativa total [pu ou W];

Qt - Potência reativa total [pu ou VAr];

Dt - Potência deformante [pu ou VAr];

St - Potência aparente total não considerando a distorção harmônica [pu ou VA];

Stc - Potência aparente total com distorção harmônica [pu ou VA].

- P1 - Potência ativa correspondente à 1ª harmónica [pu ou W];
P3 - Potência ativa correspondente à 3ª harmónica [pu ou W];
Q1 - Potência reativa correspondente à 1ª harmónica [pu ou VAr];
Q3 - Potência reativa correspondente à 3ª harmónica [pu ou VAr];
 p_1 - Potência instantânea correspondente à 1ª harmónica [pu ou VA];
 p_3 - Potência instantânea correspondente à 3ª harmónica [pu ou VA];
cos ϕ_t - Fator de potência total sem distorção harmónica;
cos ϕ_{yt} - Fator de potência devido apenas à distorção harmónica;
cos ϕ_{tc} - Fator de potência total com distorção harmónica.

Assim, verifica-se que, sem retificação, mas com harmónicas na tensão, num circuito RL série, o fator de potência indutivo diminui de 0,8 para 0,797. Quanto às harmónicas de tensão, da Fig. 5.2 ($\alpha_1 = 0$ e $\alpha_3 = -\pi$) e da Fig. 5.3 ($\alpha_1 = 0$ e $\alpha_3 = 0$), os resultados dos valores eficazes das tensões e das correntes, e os valores médios das potências, são precisamente iguais.

Controladores de potência para cargas resistivas

Quando existe a necessidade de regular a potência fornecida a aparelhos de iluminação, aquecimento ou outros resistivos, é comum a utilização de dispositivos de eletrónica de potência baseados na comutação de tirístores, de forma a baixar o valor eficaz da onda de tensão. Quanto maiores forem os tempos de comutação, menores são as potências entregues às cargas e maior será a distorção harmónica.

Balastos eletrónicos de iluminação

Nos balastos eletrónicos sem filtros adequados, a corrente alternada da rede de alimentação converte-se em corrente contínua através de uma ponte retificadora [31], com o objetivo de a converter numa tensão de elevada frequência para melhorar a eficiência energética e luminotécnica dos aparelhos de iluminação. Este processo de retificação será portanto responsável por poluição harmónica nas redes.

Logicamente a Taxa de Distorção Harmónica da Corrente de alimentação dos aparelhos, varia de fabricante para fabricante.

Acionamentos e conversores trifásicos

Apesar dos enormes benefícios que os conversores trifásicos trouxeram, nomeadamente no campo da eficiência energética, nos processos de arranque dos motores, estes também trouxeram problemas no campo da distorção harmónica.

Outra importante fonte de poluição harmónica nas instalações são os sistemas de UPS. O princípio de funcionamento dos accionamentos trifásicos de corrente alternada baseia-se na inversão após retificação trifásica da onda de entrada, de forma a produzir uma tensão alternada de frequência variável de forma a poder controlar a velocidade de um motor. A corrente de entrada no acionamento não terá assim uma forma sinusoidal, contendo portanto conteúdo harmónico dependente do regime de funcionamento do motor.

5.3.6 MEDIÇÃO DE HARMÓNICAS EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Aparelhos de medição

Para determinar os valores distorção harmónica de uma instalação é necessário conhecer os valores das diferentes componentes harmónicas de uma determinada onda, o que representa um desafio para os aparelhos de medição convencionais.

Os aparelhos de medição convencionais estão apenas aptos para a leitura de sinais sinusoidais, não sendo portanto apropriados para a medição de sinais em instalações onde exista a influência de harmónicas, ou seja, na grande maioria das instalações. Quando utilizados em instalações onde existam harmónicas, existe a forte possibilidade de serem cometidos erros grosseiros de leitura, devido ao facto dos aparelhos de medição empregarem para o cálculo do valor eficaz, uma relação apenas válida para sinais sinusoidais [29].

De forma a realizar medições dos indicadores relacionados com a medição de sinais com conteúdo harmónico, surgiram aparelhos com a capacidade de analisar as composições harmónicas das ondas, onde se inclui a frequência fundamental e as suas múltiplas em toda a faixa de frequência de interesse.

Apresentam-se adiante alguns tipos de aparelhos com a capacidade de realizar medições relacionadas com o conteúdo harmónico:

- Analisadores de espectro de frequências;
- Equipamentos portáteis específicos para esse fim;
- Registadores digitais de grandezas com este tipo de funções.

Estes aparelhos de medição são designados como “True RMS” por serem capazes de calcular o verdadeiro valor eficaz das grandezas em causa, dentro de uma determinada largura de banda. Geralmente considera-se suficiente uma largura de banda até aos 1 kHz (17ª harmónica) [27].

Geralmente estes aparelhos de medição realizam as seguintes leituras:

- O valor eficaz total (RMS ou rms);
- O valor eficaz de cada harmónica (RMS ou rms);
- A THD em tensão;
- A THD em corrente;
- O desfasamento harmónico entre tensões e correntes;
- O espectro harmónico;
- O fator de potência;
- O fator de crista;
- A potência deformante.

5.3.7 EFEITOS DAS HARMÓNICAS NAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Apesar das potencialidades dos dispositivos eletrónicos, quer no campo da qualidade de vida que nos trazem, quer no campo da eficiência energética, estes são também responsáveis pela diminuição da qualidade de energia devido à poluição harmónica que provocam.

A poluição harmónica nas instalações eléctricas está associada a aquecimentos excessivos dos equipamentos, ressonâncias, disparos intempestivos de dispositivos de proteção e quedas de tensão mais elevadas do que seria expectável.

Apresentam-se posteriormente os principais problemas associados à poluição harmónica numa instalação eléctrica.

Interferências nos sistemas de telecomunicações

Os sistemas de telecomunicações de uma instalação, nomeadamente os sistemas de voz, dados e de gestão técnica centralizada, podem ser afetados pelos fenómenos harmónicos presentes nas Instalações Eléctricas. As interferências podem ser responsáveis pela existência de problemas nos sistemas de transmissão, nomeadamente no que diz respeito ao ruído.

A origem das interferências deve-se à elevação do valor eficaz das correntes, aumentando assim as intensidades dos campos magnéticos gerados pelas mesmas, o que pode provocar acoplamentos indutivos nas redes mais sensíveis. Esta pode ser a explicação de anomalias que ocorrem nos sistemas de transmissão de voz, de dados e de comando e controlo [27].

A possibilidade de ocorrência deste tipo de interferências deverá ser estudada no âmbito da normalização relacionada com a compatibilidade eletromagnética entre sistemas.

Uma forma de solucionar esta problemática é o recurso à utilização de cablagem blindada e ou separação física das Instalações Elétricas das outras instalações.

Equipamentos eletrónicos e informáticos

Apesar deste tipo de equipamentos ser responsável por boa parte do conteúdo harmónico presente numa instalação, os mesmos são também sensíveis às distorções harmónicas.

As harmónicas numa instalação poderão ser responsáveis pela perda de dados em equipamentos informáticos, ou gerar o mau funcionamento dos mesmos, sendo portanto fundamental controlar as taxas de distorção harmónica em instalações destinadas à alimentação de elevado número de equipamentos informáticos, tais como edifícios de escritórios ou datacenters.

Medidores de energia

Os medidores de energia de tecnologia antiquada, com princípio de funcionamento baseado na indução, apresentam erros de leitura quando sujeitos à presença de fenómenos harmónicos.

Aparelhos de iluminação

As lâmpadas instaladas nos aparelhos de iluminação são elementos sensíveis à distorção harmónica das Instalações Elétricas.

As lâmpadas do tipo incandescente quando sujeitas a sinais de tensão com conteúdo harmónico, e mais concretamente quando o valor eficaz das tensões que lhes é aplicada, ficam sujeitas a um maior aquecimento dos filamentos, provocando a redução da sua vida útil [27].

Disparos nos dispositivos de proteção

As distorções harmônicas de corrente e de tensão têm influência nos dispositivos de proteção, podendo provocar disparos intempestivos ou maiores tempos de operação. Esta problemática ocorre devido aos elevados valores de pico que podem ocorrer nas distorções harmônicas, ou devido ao sobreaquecimento provocado nos relés térmicos ou elevação do campo magnético provocado nos relés magnéticos.

No caso de instalações com grande concentração de fontes de alimentação monofásicas e equipamentos eletrônicos, onde as 3^{as} harmônicas são predominantes, é frequente ocorrer o disparo intempestivo das proteções diferenciais, sendo nesse caso recomendada a utilização de circuitos independentes para alimentação de pequenos grupos destes equipamentos, e a utilização de dispositivos diferenciais imunizados.

Os fusíveis também são elementos afetados pela poluição harmônica existente nas Instalações Elétricas. Quando percorrido por uma corrente onde existam harmônicas, um fusível está sujeito a um aquecimento adicional nos elementos destinados à proteção por fusão, o que poderá levar à rutura antecipada desses elementos, modificando assim as suas características funcionais [27].

Transformadores

A poluição harmônica numa instalação também poderá pôr em causa o funcionamento e o próprio dimensionamento do mesmo, para além da diminuição do seu rendimento devido às maiores perdas.

As correntes de Foucault, que normalmente representam aproximadamente 10% das perdas à plena carga, aumentam em função do quadrado da frequência das harmônicas [32]. Verifica-se portanto a necessidade de sobredimensionar os transformadores em função da natureza das cargas que alimentam.

Bancos de condensadores para correção do fator de potência e fenómenos associados

A poluição harmônica numa instalação poderá interferir com os bancos de condensadores. Considerando apenas a onda de tensão fundamental, quando um banco de condensadores é colocado em paralelo com a fonte de tensão, poderão fluir, pelo condensador, correntes mais elevadas do que o que seria espectável. Este fenómeno pode ocorrer devido à variação inversa da impedância dos elementos capacitivos com o aumento

das frequências. É portanto necessário ter em conta a poluição harmónica de uma instalação aquando da escolha do banco de condensadores.

Outro problema deve-se ao facto da possibilidade de ocorrer ressonância nos condensadores, com a indutância da fonte de alimentação a uma dada frequência do banco de compensação de fator de potência para a 1ª harmónica, podendo provocar avarias nos bancos de condensadores.

Apenas a título de revisão teórica, a “Ressonância Elétrica” é a situação em que ocorre a uma dada frequência particular para a qual os efeitos capacitivo e indutivo se anulam mutuamente, o que faz com que tal circuito “aparente ser” meramente resistivo [27].

Num circuito RL//C a capacidade de ressonância C_k , em F, com R em Ω , e L em H, para cada harmónica de índice k , pode ser dada por:

$$C_k = \frac{L}{R^2 + k^2 \omega^2 L^2} \quad (5.46)$$

Pode-se verificar portanto que numa instalação com correção do fator de potência, esta pode estar sujeita à ressonância entre a fonte de alimentação e o banco de condensadores, quando estiver a alimentar cargas geradoras de harmónicas com frequência da mesma ordem da frequência de ressonância, o que poderá provocar danos em diversos equipamentos.

É possível evitar a ressonância, acrescentando uma indutância em série com os condensadores do banco de compensação, para que o conjunto seja indutivo na frequência de harmónica significativa de ordem mais baixa, limitando também a corrente harmónica que circule nos condensadores [32].

Máquinas elétricas rotativas

O rendimento das máquinas elétricas rotativas é afetado pelo conteúdo harmónico das tensões de alimentação.

Tal como nos transformadores, quando houver conteúdo harmónico na alimentação de máquinas elétricas rotativas, aumentam as perdas por correntes de Foucault.

A distorção harmónica provoca também uma perda adicional nos enrolamentos, devido ao já abordado efeito pelicular.

Quando um motor eléctrico é sujeito à distorção harmónica de nomeadamente as harmónicas de ordem negativa (sentido inverso de propagação normal da onda), é gerado um campo girante oposto ao provocado pela onda fundamental, reduzindo assim a capacidade de acionamento da máquina em questão [27].

É portanto essencial ter em conta os fenómenos harmónicos no dimensionamento das proteções do motor.

Outra problemática associada à distorção harmónica na alimentação de motores está associada ao aumento de ruído e vibrações, o que poderá levar ao desgaste prematuro de alguns elementos da máquina.

Dimensionamento criterioso dos condutores de neutro

Numa instalação onde exista poluição harmónica é necessário proceder ao dimensionamento criterioso dos condutores de neutro.

Quando um sistema trifásico de tensões alimenta uma carga linear e equilibrada, verifica-se a inexistência de corrente no condutor neutro, pois existe um desfasamento de 120° entre as três tensões. Para que surja alguma corrente no condutor neutro é necessário que exista um desequilíbrio na carga. Esta circunstância tem sido aproveitada pela normalização e pelos projetistas, resultando na redução da secção do condutor de neutro em relação condutores de fase de elevada secção, sendo apenas necessário ter em conta os desequilíbrios da carga.

No caso de se considerar um sistema alimentação trifásico alimentando cargas não lineares geradoras de distorção harmónica, nomeadamente fontes de tensão monofásicas e outros equipamentos eletrónicos, verifica-se a possibilidade de ocorrência de valores eficazes de corrente de neutro superiores às correntes de fase, sendo portanto perigoso o cálculo pelos processos tradicionais. Este fenómeno ocorre devido ao facto das harmónicas ímpares múltiplas de 3 serem conduzidas pelos condutores de fase e se somarem algebricamente no condutor de neutro, fazendo com que o valor eficaz da corrente de neutro possa ser até $\sqrt{3}$ vezes superior ao valor da corrente de fase.

Verifica-se portanto necessário o dimensionamento da secção do condutor de neutro, tendo em conta o valor eficaz da corrente que o percorre, o que poderá resultar numa secção igual aos próprios condutores de fase ou até superior.

Os critérios de dimensionamento já abordados no capítulo 4, e na aplicação de cálculo, têm já em conta as distorções harmónicas que possam existir numa instalação.

É necessário ter especial atenção a esta problemática quando se realiza o projeto e dimensionamento de instalações responsáveis pela alimentação de um número consideravelmente elevado de fontes monofásicas não lineares, cargas geradoras de

harmônicas múltiplas ímpares de 3, como o caso de edifícios de escritórios ou de centros informáticos.

No caso de a instalação estar sujeita às perturbações causadas pela distorção harmónica, devem ser aplicados fatores de correção de acordo com o guia UTE-15-105.

O guia UTE-15-105 define que apenas é admissível reduzir a secção do condutor de neutro nos circuitos trifásicos com secções superiores a 16 mm² no caso de almas condutoras de cobre, e a 25 mm² no caso de condutores de alumínio, se a taxa de distorção harmónica da corrente for igual ou inferior a 15%. Nos casos em que a TDHI for superior a 15% deve ser considerado um fator de redução da corrente admissível no condutor de neutro com um valor igual a 0,84. Quando a TDHI for superior a 33% deve adicionalmente considerar-se que a corrente do condutor de neutro é 1,45 vezes superior à corrente de fase.

Fator de potência e potência deformante

Numa instalação onde exista conteúdo harmónico não é possível expressar as grandezas elétricas de forma convencional, ou seja, considerando apenas as ondas fundamentais, verificando-se assim um desvio entre o fator de potência ideal (1ª harmónica – $\cos\varphi \equiv \cos\varphi_1$) e o fator de potência total devido à presença de harmónicas ($\cos\varphi_t$).

O fator de potência total com distorção harmónica, $\cos\varphi_{tc}$, pode ser definido como sendo a relação entre a potência ativa e a potência aparente de uma dada instalação, independentemente do conteúdo harmónico que as ondas de tensão e de corrente apresentem.

O fator de potência ideal (1ª harmónica – $\cos\varphi$) pode ser definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente referente apenas a ondas sinusoidais puras.

Pode-se assim verificar que apenas o fator de potência ideal ($\cos\varphi \equiv \cos\varphi_1$) se mantém inalterável, quando estamos perante grandezas puramente sinusoidais, isentas de conteúdo harmónico.

Como geralmente num circuito com diversas harmónicas, se verifica a relação: $S_{tc}^2 \geq P_t^2 + Q_t^2$, então define-se uma potência deformante (D ou D_t , em VAr ou pu), que será dada por:

$$S_{tc}^2 = P_t^2 + Q_t^2 + D_t^2 = S_t^2 + D_t^2 \quad (5.47)$$

Também é importante considerar a potência aparente total (S_t em VA ou pu), em que não é considerada a distorção harmónica, que é dada por (teorema de Pitágoras):

$$St^2 = Pt^2 + Qt^2 = [U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k]^2 + [\sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k]^2 \quad (5.48)$$

sendo o fator potência total, não considerando a distorção harmônica ($\cos \varphi_t$):

$$\cos \varphi_t = \frac{Pt}{St} = \frac{Pt}{\sqrt{Pt^2 + Qt^2}} =$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} \frac{U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k}{\sqrt{(U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k)^2 + (\sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k)^2}} \quad (\text{com componente contínua}) \\ \frac{\sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k}{\sqrt{(\sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k)^2 + (\sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin \varphi_k)^2}} \quad (\text{apenas harmônicas}) \end{array} \right. \quad (5.49)$$

E o fator potência total, considerando a distorção harmônica ($\cos \varphi_{tc}$):

$$\cos \varphi_{tc} = \frac{Pt}{Stc} =$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} \frac{U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 (1 + TDH_P)}{U_0 I_0 \sqrt{1 + \sum_{k=1}^{\infty} (\frac{U_k}{U_0})^2} \sqrt{1 + \sum_{k=1}^{\infty} (\frac{I_k}{I_0})^2}} \quad (\text{com componente contínua}) \\ \frac{\sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos \varphi_k}{U_1 I_1 \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} (\frac{U_k}{U_1})^2} \sqrt{1 + \sum_{k=2}^{\infty} (\frac{I_k}{I_1})^2}} = \frac{\cos \varphi_1 (1 + TDH_P)}{\sqrt{1 + TDH_U^2} \sqrt{1 + TDH_I^2}} \quad (\text{apenas harmônicas}) \end{array} \right. \quad (5.50)$$

em que:

TDH_U - Taxa de distorção harmônica da tensão;

TDH_I - Taxa de distorção harmônica da corrente;

TDH_P - Taxa de distorção harmônica da potência.

Quando a tensão de alimentação é sinusoidal pura, verifica-se que $TDH_U = 0$ e, conseqüentemente:

$$\text{TDH}_p = \sum_{k=2}^{\infty} \frac{U_k I_k \cos \varphi_k}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} = 0 \quad (5.51)$$

Se a carga não for linear (por exemplo, circuitos de retificação), pode-se escrever:

$$\cos \varphi_t = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + \text{TDH}_1^2}} \quad (\text{apenas harmônicas}) \quad (5.52)$$

Se carga for linear, virá: $\text{TDH}_1 = 0$, e então virá:

$$\cos \varphi_t = \cos \varphi_1 \quad (5.53)$$

A potência reativa de distorção Dt (em VAR ou pu), pode ser interpretada graficamente por um sistema tridimensional de vetores, segundo três direções perpendiculares (ver Fig. 5.6).

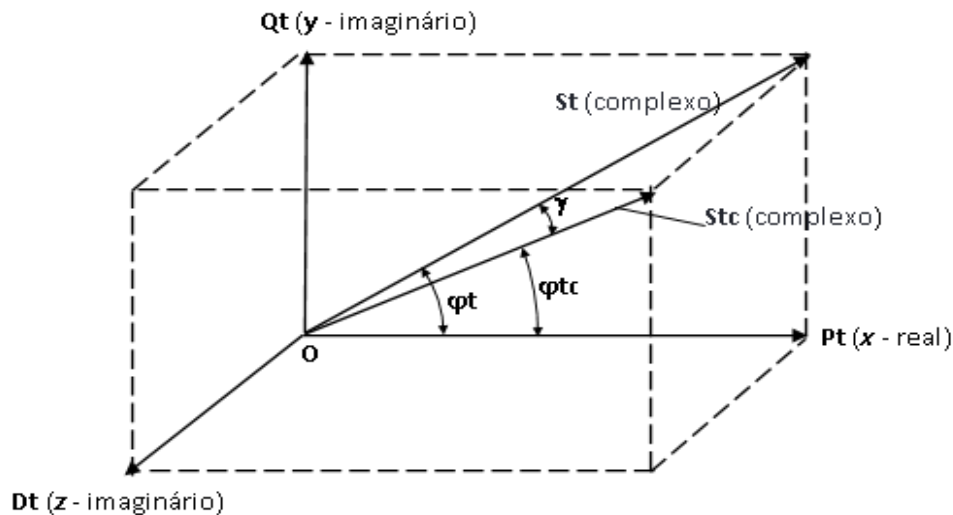


Figura 5.6 – Paralelepípedo de potências considerando a potência deformante Dt .

Da Fig.5.6, considerando os valores, em módulo, de P_t , Q_t , D_t , S_t e S_{tc} , a relação entre $\cos \varphi_t$, $\cos \gamma$ e $\cos \varphi_{tc}$, é dada por:

$$\cos \varphi_{tc} = \frac{P_t}{S_{tc}} = \frac{P_t}{S_t} \frac{S_t}{S_{tc}} = \cos \varphi_t \cos \gamma \quad (5.54)$$

5.3.8 ANÁLISE DE CARGAS NÃO LINEARES TÍPICAS

Neste ponto serão analisadas cargas não lineares típicas, com o objetivo de demonstrar o seu comportamento, e características e impactos na rede de alimentação.

Sistema de retificação de meia onda com diodo de roda livre

Considerando-se um sistema de retificação de meia onda com diodo de roda livre (de tensão à saída do díodo u , em pu ou V) – circuito indutivo RL série com a representação indicada na Fig. 5.7.

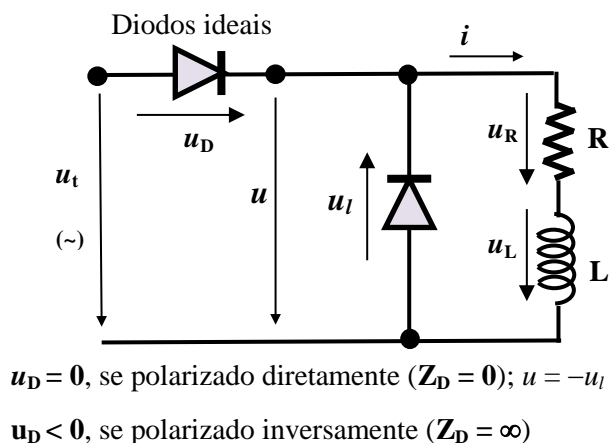


Figura 5.7 – Circuito de retificação de meia onda.

Por simplificação, considera-se que a onda de tensão aplicada u_t é sinusoidal pura (apenas com 1ª harmónica), de valor máximo igual a $U_{tM} \equiv U_M = 1$ V (ou pu), sendo a carga constituída por $R = 0,8 \Omega$ (ou pu) e $X_L = 0,6 \Omega$ (ou pu), à frequência de $f = 50$ Hz.

Da Fig. 5.7, apresenta-se na Fig. 5.8 o diagrama cartesiano, em pu, da tensão sinusoidal retificada u (meia onda), na resistência u_R , na bobina u_L , no díodo u_D , e corrente na carga i , em A (ou pu):

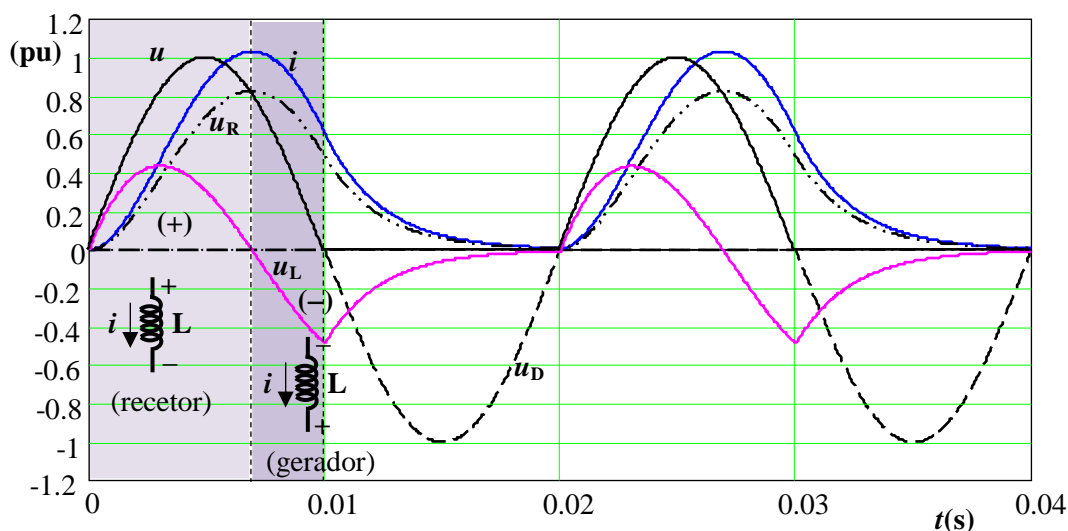


Figura 5.8 – Diagrama das tensões sinusoidais rectificadas e corrente i – retificador de meia onda.

De uma forma muito aproximada, pode-se considerar uma fonte retificada de meia onda, em que a tensão $u(t)$ é dada por:

$$u(t) = \begin{cases} U_M \sin \theta; & \theta = \omega t \in [2\kappa\pi; (2\kappa + 1)\pi] \\ 0; & \theta \in [(2\kappa + 1)\pi; 2(\kappa + 1)\pi] \end{cases} \quad \kappa \in \mathbf{Z} \quad (5.55)$$

A tensão $u(t)$, desenvolvida em séries de Fourier (retificação de meia onda), em V ou pu, será dada por:

$$\begin{cases} u_0 = U_0 = \frac{U_M}{\pi} & (k = 0; \text{ componente contínua}) \\ u_1 = U_M \frac{\sin \theta}{2} & (k = 1; \text{ 1ª harmónica}) \\ u_k = -\frac{2U_M \cos(2k\theta)}{\pi[(2k)^2 - 1]} & (2k = 2; 4; 6; \dots; \infty; \text{ harmónicas pares}) \end{cases} \quad (5.56)$$

A corrente $i(t)$, desenvolvida em séries de Fourier (retificação de meia onda), em A ou pu, será dada por:

$$\begin{cases} I_0 = \frac{U_0}{R} & (k = 0; \text{ componente contínua}) \\ i_1 = \frac{U_M \sin(\theta - \varphi_1)}{2Z_1} & (k = 1; \text{ 1ª harmónica}) \\ i_k = -\frac{2U_M \cos(2k\theta - \varphi_{2k})}{\pi[(2k)^2 - 1]Z_{2k}} & (2k = 2; 4; 6; \dots; \infty; \text{ harmónicas pares}) \end{cases} \quad (5.57)$$

em que:

$$Z_k = \sqrt{R^2 + (k\omega L)^2} \quad \text{e} \quad \varphi_k = \arccos \frac{R}{\sqrt{R^2 + (k\omega L)^2}} \quad (k = 0; 1; 2; \dots; \infty) \quad (5.58)$$

Assim, a tensão e a corrente aos terminais da carga RL (Fig. 5.7), são dadas respetivamente por:

$$\begin{aligned} u(t) &= U_0 + u_1(t) - \frac{2U_M}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta)}{(2k)^2 - 1} \\ i(t) &= I_0 + i_1(t) - \frac{2U_M}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta - \varphi_{2k})}{[(2k)^2 - 1]Z_{2k}} \end{aligned} \quad (5.59)$$

Apresenta-se na Fig. 5.9 a tensão aplicada à carga $u(t)$, as harmónicas de tensão sinusoidal retificada $u_1(t)$ (meia onda – regime permanente), e outras harmónicas pares.

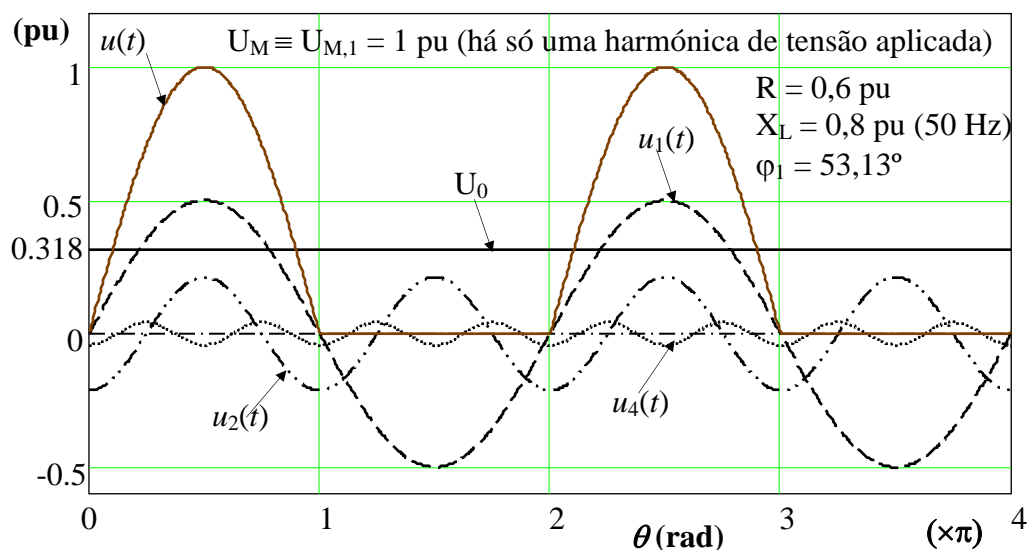


Figura 5.9 – Harmónicas de tensão sinusoidal rectificada – retificador de meia onda.

E na Fig. 5.10, as harmónicas de corrente retificada i (meia onda – regime permanente).

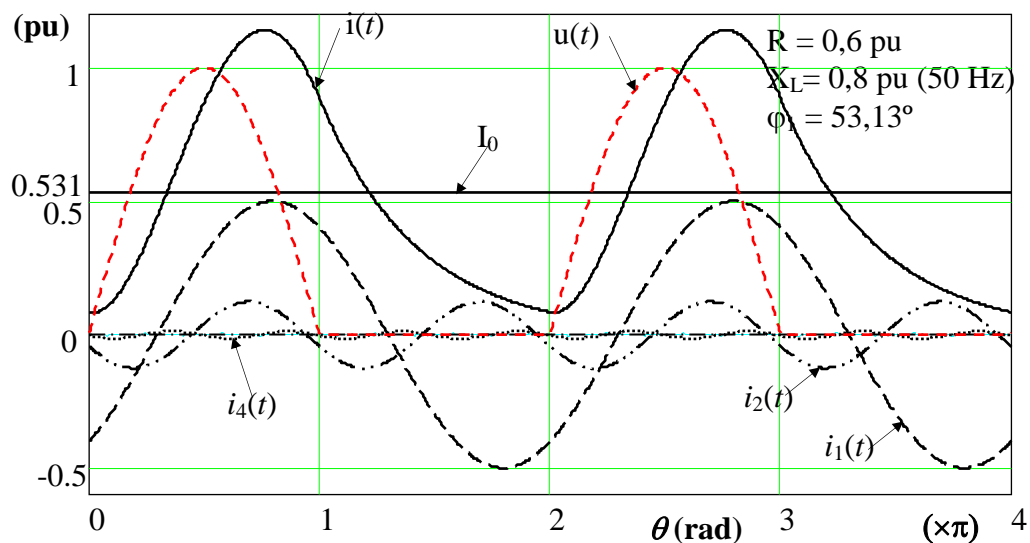


Figura 5.10 – Harmónicas de corrente rectificada – retificador de meia onda.

As amplitudes das principais harmónicas da tensão e da corrente podem ser observadas nas Figs. 5.9 e 5.10.

A tensão aplicada aos terminais da carga RL série (retificação de meia onda), será dada por:

$$\left\{ \begin{array}{l} U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ U_0^2 + \left(\frac{U_M \sin \theta}{2} \right)^2 + \left[\frac{2U_M}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta)}{(2k)^2 - 1} \right]^2 \right\} d\theta} = 0,5 \text{ pu} \\ \text{ou : } U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (U_M \sin \theta)^2 d\theta} = 0,5 \text{ pu} \end{array} \right. \quad (5.60)$$

A corrente eficaz é dada por:

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \left(\frac{U_0}{R} \right)^2 + \left[\frac{U_M \sin(\theta - \varphi_1)}{2Z_1} \right]^2 + \left[\frac{2U_M}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta - \varphi_{2k})}{[(2k)^2 - 1]Z_{2k}} \right]^2 \right\} d\theta} = 0,644 \text{ pu} \quad (5.61)$$

A potência total aparente com distorção harmónica, será:

$$S_{tc} = UI = 0,5 \cdot 0,644 = 0,322 \text{ pu} \quad (5.62)$$

As potências postas em jogo na carga RL série, são:

$$\begin{aligned} P_0 &= U_0 I_0 = \frac{U_0^2}{R} = 0,169 \text{ pu (componente contínua);} \\ P_1 &= u_1 i_1 = \frac{U_M^2 \sin \theta \sin(\theta - \varphi_1)}{4Z_1} \text{ (pu) (valor instantâneo)} \end{aligned} \quad (5.63)$$

sendo o valor médio da potência ativa, referente à 1ª harmónica, dado por:

$$P_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_1 i_1 d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{U_M^2 \sin \theta \sin(\theta - \varphi_1)}{4Z_1} d\theta = \frac{U_M^2 \cos \varphi_1}{8Z_1} = 0,075 \text{ (pu)} \quad (5.64)$$

e o valor médio da potência reativa, referente também à 1ª harmónica, é dado por:

$$Q_1 = \frac{U_M^2 \sin \varphi_1}{8Z_1} = 0,10 \text{ (pu) (valor médio da potência reativa)} \quad (5.65)$$

sendo os valores instantâneos das potências correspondentes às diversas harmónicas pares, em pu ou W, dados por:

$$P_{2k} = u_{2k} i_{2k} = \frac{4U_M^2 \cos 2k\theta \cos(2k\theta - \varphi_{2k})}{\pi^2 [(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} \quad (5.66)$$

Sendo os valores médios das potências ativa e reativa dados por:

$$P_{2k} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{4U_M^2 \cos 2k\theta \cos(2k\theta - \varphi_{2k})}{\pi^2 [(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} d\theta = \frac{2U_M^2 \cos \varphi_{2k}}{\pi^2 [(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} e$$

$$Q_{2k} = \frac{2U_M^2 \sin \varphi_{2k}}{\pi^2 [(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}}$$
(5.67)

sendo, por exemplo, em pu:

$$[P_2 = 4,627 \cdot 10^{-3} \text{ (pu)} \text{ e } Q_2 = 0,012 \text{ (pu)}; P_4 = 5,098 \cdot 10^{-5} \text{ (pu)} \text{ e } Q_4 = 2,719 \cdot 10^{-4} \text{ (pu)};$$

$$P_6 = 4,242 \cdot 10^{-6} \text{ (pu)} \text{ e } Q_6 = 3,393 \cdot 10^{-5} \text{ (pu)}; \dots].$$

A potência ativa total é dada por:

$$P_t = P_0 + P_1 + \sum_{k=1}^{\infty} P_{2k} = U_0 I_0 + \frac{U_M^2 \cos \varphi_1}{8Z_1} + \frac{2U_M^2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos \varphi_{2k}}{[(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} = 0,249 \text{ (pu)}$$
(5.68)

A potência reativa total é dada por:

$$Q_t = Q_1 + \sum_{k=1}^{\infty} Q_{2k} = \frac{U_M^2 \sin \varphi_1}{8Z_1} + \frac{2U_M^2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \varphi_{2k}}{[(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} = 0,113 \text{ (pu)}$$
(5.69)

Então a potência aparente, sem distorção harmônica, será igual a:

$$S_t = \sqrt{P_t^2 + Q_t^2} = 0,273 \text{ (pu)}$$
(5.70)

e a potência deformante virá:

$$D_t = \sqrt{S_{tc}^2 - S_t^2} = \sqrt{0,322^2 - 0,273^2} = 0,171 \text{ pu}$$
(5.71)

Assim, o fator de potência total (não considerando a distorção harmônica), é:

$$\cos \varphi_t = \frac{P_t}{S_t} = \frac{0,249}{0,273} = 0,911; \text{ ind.} \quad \left(\cos \varphi \equiv \cos \varphi_1 = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = 0,6; \text{ ind.} \right) - \text{ fator de}$$

potência relativo à 1ª harmônica); sendo o fator de distorção harmônica dado por:

$$\cos \gamma_t = \frac{S_t}{S_{tc}} = \frac{0,273}{0,322} = 0,848; \text{ ind.}$$
(5.72)

em que: $\cos \varphi_{tc} = \cos \gamma_t \cos \varphi_t = 0,773; \text{ ind.}$ (fator de potência total com distorção harmônica).

Sendo a potência instantânea relativa à tensão aplicada em relação à corrente absorvida pela rede monofásica, será:

$$p_t(\theta) = u(\theta)i(\theta)$$
(5.73)

ou por:

$$pa(\theta) = \frac{U_0^2}{R} + \frac{U_M^2 \sin \theta \sin(\theta - \varphi_1)}{4Z_1} + \frac{4U_M^2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta) \cos(2k\theta - \varphi_{2k})}{[(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} \quad (5.74)$$

A Fig. 5.11 representa a potência instantânea no circuito RL série, em que são apresentados os valores torais da tensão e da corrente, em função de θ , para harmônicas de corrente retificada (meia onda – regime permanente).

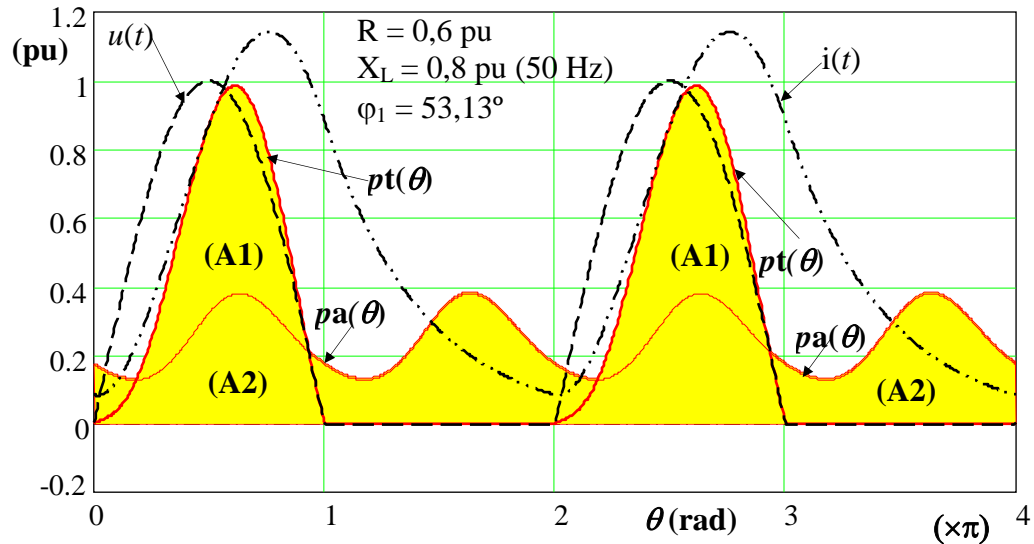


Figura 5.11 – Potência instantânea no circuito RL série – retificador de meia onda.

Da Fig. 5.11, as áreas (A1) e (A2) são iguais, pois verifica-se que a potência ativa é dada por:

$$\begin{aligned} \text{De (A1): } Pt &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} u(\theta) i(\theta) d\theta = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \left\{ U_0 + \frac{U_M \sin(\theta)}{2} - \frac{2U_M}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta)}{(2k)^2 - 1} \right\} \cdot \\ &\cdot \left\{ \frac{U_0}{R} + \frac{U_M \sin(\theta - \varphi_1)}{2Z_1} - \frac{2U_M}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta - \varphi_{2k})}{[(2k)^2 - 1] Z_{2k}} \right\} d\theta = 0,249 \text{ pu} \end{aligned} \quad (5.75)$$

Ou por:

$$\begin{aligned} \text{De (A2): } Pt &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \frac{U_0^2}{R} + \frac{U_M^2 \sin \theta \sin(\theta - \varphi_1)}{4Z_1} + \right. \\ &\left. + \frac{4U_M^2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta) \cos(2k\theta - \varphi_{2k})}{[(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} \right\} d\theta = 0,249 \text{ pu} \end{aligned} \quad (5.76)$$

Pelo que se verifica que as áreas (A1) e (A2) são iguais (ver Fig. 5.11).

Por outro lado, se considerar-se que no circuito de retificação de meia onda (ver Fig. 5.7), considerando a resistência R variável compreendida entre 0 e 1 pu ($R_j = \frac{j}{N}$; $j = 0; 1; \dots; N$; por exemplo: $N = 100$ pontos), sendo a reatância, para frequência de 50 Hz (1ª harmónica), dada por: $XL_j = \omega L_j = \sqrt{1 - (R_j)^2}$ (também compreendida entre 1 e 0 pu). Para a 1ª harmónica, o fator de potência, compreendido entre 0 e 1, em função da variação de R_j (ou de R variável) e de XL_j (ou de XL variável), é dado por: $\cos \varphi_1 = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$.

Apresenta-se, na Fig. 5.12, a variação da resistência R e da reatância XL , e de impedância, de módulo sempre igual a 1 pu, e de φ_1 em função do fator de potência $\cos \varphi_1$ (circuito RL série – retificação de meia onda, regime permanente, 1ª harmónica).

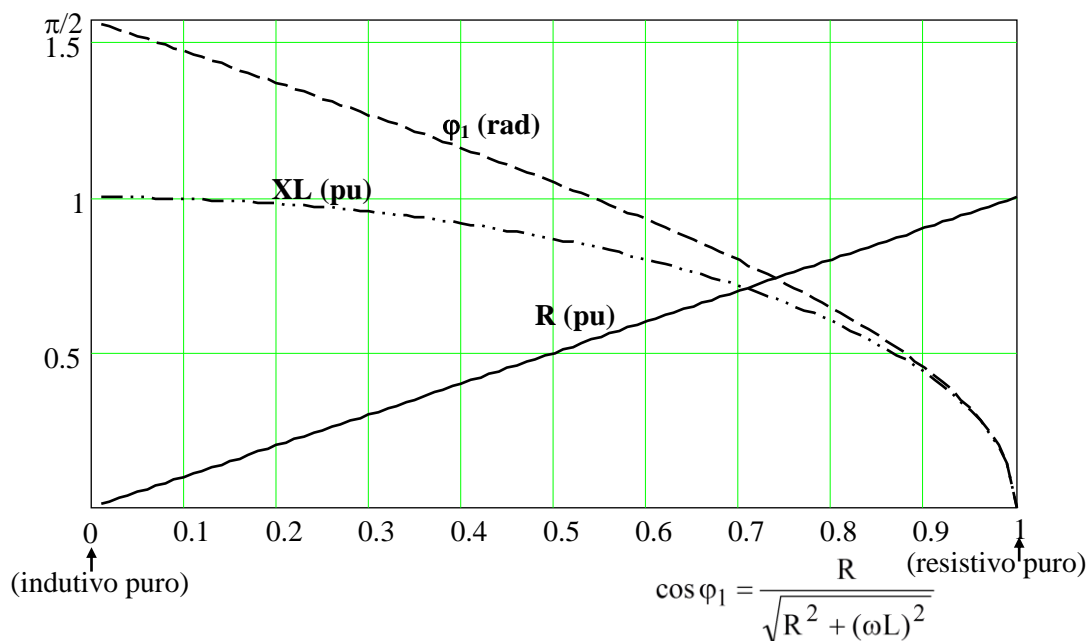


Figura 5.12 – Variação da resistência, da reatância e de impedância – retificador de meia onda.

Assim, o fator de potência, para a 1ª harmónica, virá: $\cos \varphi_1 = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$

($0 < \cos \varphi_1 \leq 1$), em que virá por desenvolvimento em séries de Fourier [retificação de meia onda, incluindo para iterações de índice j para a variação de carga e do respectivo ângulo de defasagem – ver equação (5.56)]:

$$\begin{cases} u_0 \equiv u_{0,j} = U_0 = \frac{U_M}{\pi} \quad (k = 0; \text{ componente contínua}) \\ u_1 \equiv u_{1,j} = \frac{U_M \sin \theta}{2} \quad (k = 1; \text{ 1ª harmónica}) \\ u_{2k} \equiv u_{2k,j} = \frac{-2U_M \cos(2k\theta)}{\pi[(2k)^2 - 1]} \quad (2k = 2; 4; 6; \dots; \infty; \text{ harmónicas pares}) \end{cases} \quad (5.77)$$

$$\begin{cases} I_{0,j} = \frac{U_0}{R_j} \quad (k = 0; \text{ componente contínua}) \\ i_{1,j} = \frac{U_M \sin(\theta - \varphi_{1,j})}{2Z_{1,j}} \quad (k = 1; \text{ 1ª harmónica, para valores de } 0 < R_j \leq 1 \text{ pu}) \\ i_{2k,j} = \frac{-2U_M \cos(2k\theta - \varphi_{2k,j})}{\pi[(2k)^2 - 1]Z_{2k,j}} \quad (2k = 2; 4; 6; \dots; \infty; \text{ harmónicas pares}) \end{cases} \quad (5.78)$$

em que:

$$\begin{cases} \varphi_{1,j} = \arccos \frac{R_j}{\sqrt{(R_j)^2 + (\omega L_j)^2}}; \quad Z_{1,j} = \sqrt{(R_j)^2 + (\omega L_j)^2} \\ \varphi_{2k,j} = \arccos \frac{R_j}{\sqrt{(R_j)^2 + (2k\omega L_j)^2}}; \quad Z_{2k,j} = \sqrt{(R_j)^2 + (2k\omega L_j)^2} \end{cases} \quad (5.79)$$

Da Fig. 5.7, sendo considerada uma impedância de carga Z sempre constante e igual a 1 pu (à frequência de 50 Hz), a Fig. 5.13 apresenta diversos valores de corrente retificada (meia onda – regime permanente) no troço de circuito RL série, para fatores de potência, relativos à 1ª harmónica, de $\cos \varphi_1 = 0,1; \text{ind.}$; $\cos \varphi_1 = 0,2; \text{ind.}$; $\cos \varphi_1 = 0,4; \text{ind.}$; $\cos \varphi_1 = 0,6; \text{ind.}$; $\cos \varphi_1 = 0,8; \text{ind.}$ e $\cos \varphi_1 = 1$ (resistivo puro).

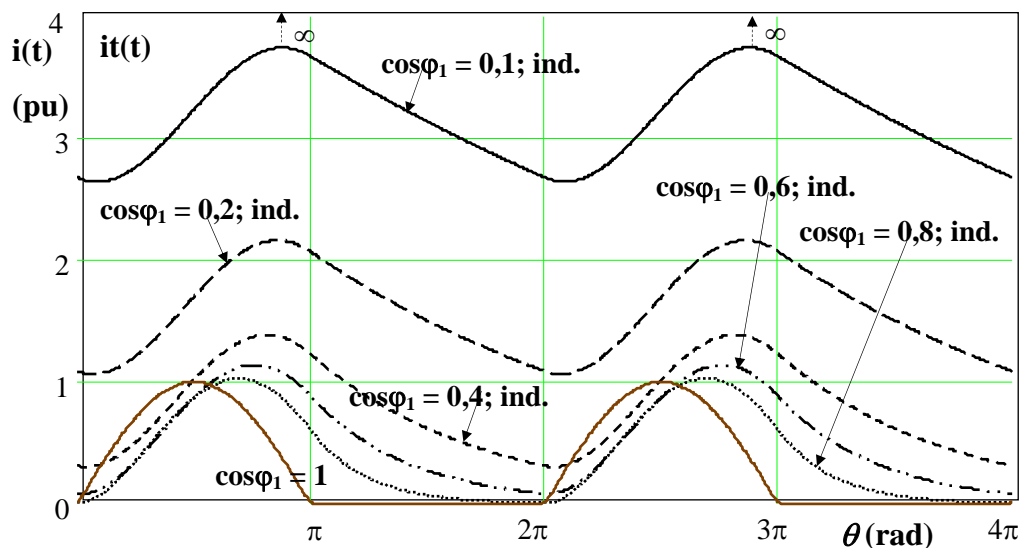


Figura 5.13 – Corrente retificada no troço de circuito RL série para diversos valores de $\cos \varphi_1$ – retificador de meia onda.

Da Fig. 5.13 (retificação de meia onda – regime permanente), verifica-se que quando o circuito é indutivo puro, a corrente tende para valores muito elevados (∞).

Para a 1ª harmónica, sendo a tensão eficaz aplicada à carga RL série (ver Fig. 5.7), dada por:

$$U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (U_M \sin \theta)^2 d\theta} = 0,5 \text{ pu}, \text{ a corrente eficaz em função de } R_j \text{ (} 0 < R_j \leq 1 \text{ pu), de}$$

$$\cos \varphi_{1,j} = \frac{R_j}{\sqrt{R_j^2 + (\omega L_j)^2}} \text{ ou } \cos \varphi_{2k,j} = \frac{R_j}{\sqrt{R_j^2 + (2k\omega L_j)^2}} \text{ (pois } \sqrt{R_j^2 + (\omega L_j)^2} = Z_{1,j} = 1 \text{ pu}$$

e $\sqrt{R_j^2 + (2k\omega L_j)^2} = Z_{2k,j} \geq 1 \text{ pu}$, para qualquer valor de R_j), virá igual a:

$$I_j = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \left(\frac{U_0}{R_j} \right)^2 + \left[\frac{U_M \sin(\theta - \varphi_{1,j})}{2Z_{1,j}} \right]^2 + \frac{4}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{U_M \cos(2k\theta - \varphi_{2k,j})}{[(2k)^2 - 1] Z_{2k,j}} \right\}^2 \right\} d\theta} \quad (5.80)$$

A potência total com distorção harmónica, em VA ou pu, é dada por:

$$Stc_j = UI_j \quad (5.81)$$

A potência ativa total, em W ou pu, virá dada por:

$$Pt_j = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \frac{U_0^2}{R_j} + \frac{U_M^2 \sin \theta \sin(\theta - \varphi_{1,j})}{2} \frac{1}{2Z_{1,j}} + \frac{4U_M^2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta) \cos(2k\theta - \varphi_{2k,j})}{[(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k,j}} \right\} d\theta \quad (5.82)$$

ou:

$$Pt_j = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_M^2 \left\{ \frac{1}{\pi} + \frac{\sin \theta}{2} - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta)}{(2k)^2 - 1} \right\} \left\{ \frac{1}{\pi R_j} + \frac{\sin(\theta - \varphi_{1,j})}{2Z_{1,j}} - \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta - \varphi_{2k,j})}{[(2k)^2 - 1] Z_{2k,j}} \right\} d\theta \quad (5.83)$$

ou ainda por:

$$Pt_j = U_0 I_{0,j} + \frac{U_M^2 R_j}{8(Z_{1,j})^2} + \frac{2U_M^2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{R_j}{[(2k)^2 - 1]^2 (Z_{2k,j})^2} \quad (5.84)$$

E a potência reativa total, em VAR ou pu, é dada por:

$$Q_{t_j} = \frac{U_M^2 \omega L_j}{8(Z_{1,j})^2} + \frac{2U_M^2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2k\omega L_j}{[(2k)^2 - 1]^2 (Z_{2k,j})^2} \quad (5.85)$$

Assim, a potência aparente total, em VA ou pu, não considerando a distorção harmónica, é:

$$S_{t_j} = \sqrt{(P_{t_j})^2 + (Q_{t_j})^2} \quad (5.86)$$

Então, o fator de potência total, será:

$$\cos \varphi_{t_j} = \frac{P_{t_j}}{S_{t_j}} \quad (5.87)$$

O fator de potência devido apenas à distorção harmónica, virá:

$$\cos \gamma_{t_j} = \frac{S_{t_j}}{S_{c_j}} = \frac{\sqrt{(P_{t_j})^2 + (Q_{t_j})^2}}{UI_j} \quad (5.88)$$

O fator de potência total com distorção harmónica, será:

$$\cos \varphi_{t_c_j} = \frac{P_{t_j}}{S_{c_j}} \quad (5.89)$$

A potência reativa deformante, em VAr ou pu, será:

$$D_{t_j} = \sqrt{S_{c_j}^2 - S_{t_j}^2} \quad (5.90)$$

Apresenta-se agora, na Fig. 5.14, a retificação (meia onda – regime permanente) do troço de circuito RL série, para $Z = \text{cte}$, e para 0 (indutivo puro) $< \cos \varphi_1 \leq 1$ (resistivo puro) com a variação dos diversos fatores de potência.

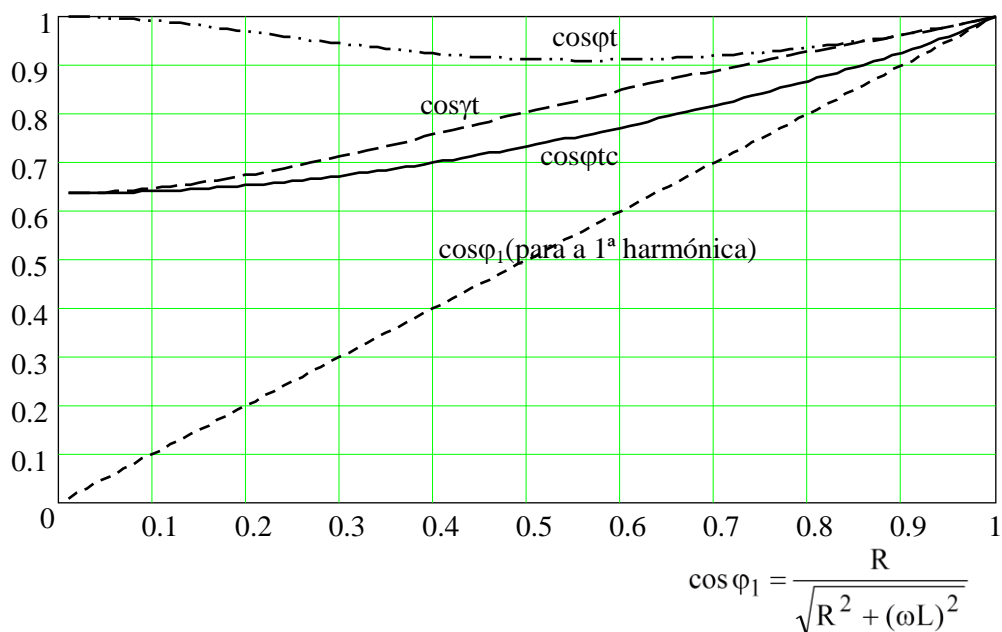


Figura 5.14 – Variação dos diversos factores de potência em função de $\cos \varphi_1$ – retificador de meia onda.

Da Fig. 5.14, verifica-se que na retificação de meia onda, o fator de potência total sem distorção harmônica ($\cos\phi_t$) é próximo de 1, tendo o valor mínimo para $\cos\phi_1 \cong 0,565$ (de valor igual a $\cos\phi_t \cong 0,910$), e que o fator de potência total com distorção harmônica é mínimo ($\cos\phi_{tc} = 0,637 \cong 2/\pi$), para $\cos\phi_1 \cong 0$.

Sistema de retificação de onda completa

Se para o mesmo exemplo (R variável entre 0 e 1 pu, e $XL = \sqrt{1-R^2}$ – também compreendida entre 1 e 0 pu), considerando uma retificação de onda completa, que se pode observar de acordo com a Fig. 5.15.

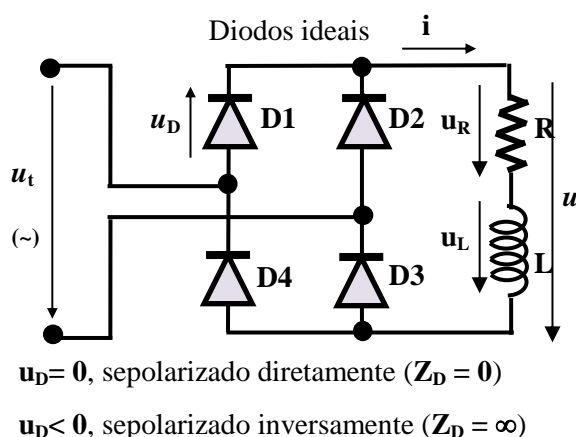


Figura 5.15 – Circuito de retificação de onda completa (ponte de Graetz).

Assim, também o fator de potência, para a 1ª harmônica, será: $\cos\phi_1 = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$

($0 < \cos\phi_1 \leq 1$), e para as outras harmônicas pares, será: $\cos\phi_{2k} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (2k\omega L)^2}}$ ($2k = 2;$

4; 6; ...; ∞), em que a tensão $u(t) \equiv u(\theta)$, em V ou pu, por desenvolvimento em séries de Fourier (retificação de onda completa), virá:

$$\begin{cases} u_0 \equiv U_0 = \frac{2U_M}{\pi} & (k = 0; \text{ componente contínua}) \\ u_{2k} = \frac{-4U_M \cos(2k\theta)}{\pi[(2k)^2 - 1]} & (2k = 2; 4; 6; \dots; \infty; \text{ harmônicas pares}) \end{cases} \quad (5.91)$$

A corrente $i(t) \equiv i(\theta)$, desenvolvida em séries de Fourier (retificação de onda completa), em A ou pu, para $0 < R_j \leq 1$ pu, será dada por:

$$\begin{cases} I_{0,j} = \frac{U_0}{R_j} \quad (k = 0; \text{ componente contínua}) \\ i_{2k,j} = \frac{-4U_M \cos(2k\theta - \varphi_{2k,j})}{\pi[(2k)^2 - 1]Z_{2k,j}} \quad (2k = 2; 4; 6; \dots; \infty; \text{ harmónicas pares}) \end{cases} \quad (5.92)$$

Assim, a tensão e a corrente totais, em função de $\theta = \omega t$, são dadas respetivamente por:

$$u(\theta) = U_0 - \frac{4U_M}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta)}{(2k)^2 - 1} \quad (5.93)$$

$$i_j = I_{0,j} - \frac{4U_M}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta - \varphi_{2k,j})}{[(2k)^2 - 1]Z_{2k,j}} \quad (\text{para valores de } 0 < R_j \leq 1 \text{ pu})$$

Para o caso particular de $R_j = R = 0,6$ pu e $X_L = 0,8$ pu, sendo $U_M = 1$ pu, a Fig. 5.16 apresenta harmónicas de tensão sinusoidal retificada $u(t)$ (onda completa – regime permanente), e a Fig. 5.17 apresenta harmónicas da corrente retificada $i(t)$.

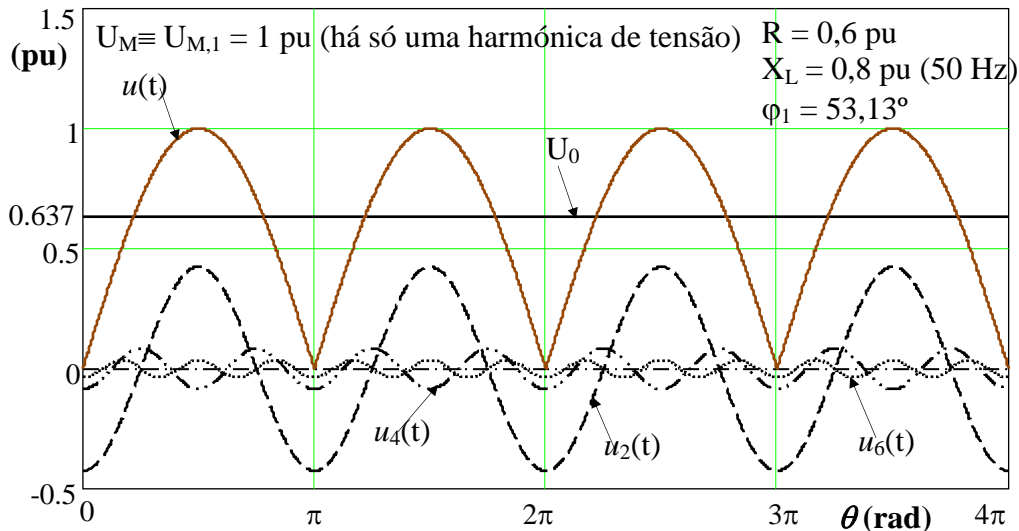


Figura 5.16 – Harmónicas de tensão sinusoidal retificada – retificador de onda completa.

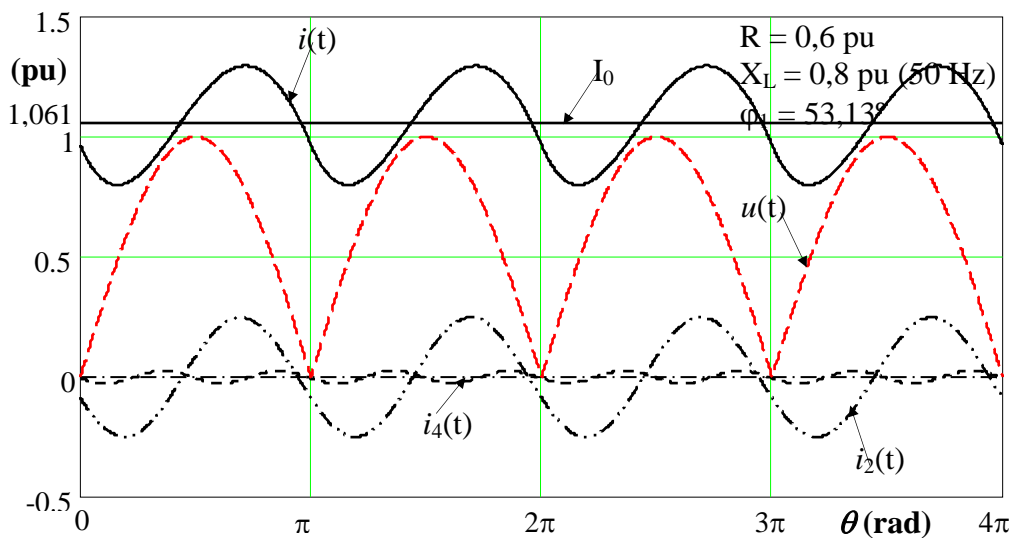


Figura 5.17– Harmónicas de corrente retificada – retificador de onda completa.

Assim, as amplitudes das principais harmónicas da tensão e da corrente podem ser observadas nas Figs. 5.16 e 5.17.

A tensão aplicada aos terminais da carga RL série (retificação de onda completa), será dada por:

$$\left\{ \begin{array}{l} U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ U_0^2 + \left[\frac{4U_M}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta)}{(2k)^2 - 1} \right]^2 \right\} d\theta} = 0,707 \text{ pu} \\ \text{ou : } U = \sqrt{\left(\frac{2U_M}{\pi} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{4U_M}{\pi} \right)^2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k)^2 - 1}} = 0,707 \text{ pu} \\ \text{ou : } U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (U_M \sin \theta)^2 d\theta} = 0,707 \text{ pu} \end{array} \right. \quad (5.94)$$

A corrente eficaz, para $R = R_j = 0,6 \text{ pu}$ ($XL = 0,8 \text{ pu}$), é dada por:

$$\left\{ \begin{array}{l} I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \left(\frac{U_0}{R} \right)^2 + \left[\frac{4U_M}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta - \varphi_{2k})}{[(2k)^2 - 1]Z_{2k}} \right]^2 \right\} d\theta} = 1,076 \text{ pu} \\ \text{ou : } I = \sqrt{\left(\frac{U_0}{R} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{4U_M}{\pi} \right)^2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{[(2k)^2 - 1]Z_{2k}}} = 1,076 \text{ pu} \end{array} \right. \quad (5.95)$$

A potência aparente total com distorção harmónica, será:

$$S_{tc} = UI = 0,707 \cdot 1,076 = 0,761 \text{ pu} \quad (5.96)$$

As potências postas em jogo na carga RL série, são:

$$P_0 = U_0 I_0 = \frac{U_0^2}{R} = 0,675 \text{ pu (componente contínua);} \quad (5.97)$$

$$p_{2k} = u_{2k} i_{2k} = \frac{16U_M^2 \cos 2k\theta \cos(2k\theta - \varphi_{2k})}{\pi^2 [(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} \text{ (pu) (valor instantâneo)}$$

sendo os valores médios das respetivas potências ativas, dados por:

$$P_{2k} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{16U_M^2 \cos 2k\theta \cos(2k\theta - \varphi_{2k})}{\pi^2 [(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} d\theta = \frac{8U_M^2 \cos \varphi_{2k}}{\pi^2 [(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} \quad (5.98)$$

e o valores médios das respetivas potências reativas, dados por:

$$Q_{2k} = \frac{8U_M^2 \sin \varphi_{2k}}{\pi^2 [(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} \quad (5.99)$$

sendo, por exemplo, para $R_j = R = 0,6$ pu e $XL = 0,8$ pu:

$$[P_2 = 0,019 \text{ (pu)} \quad e \quad Q_2 = 0,049 \text{ (pu)}; P_4 = 2,039 \cdot 10^{-4} \text{ (pu)} \quad e \quad Q_4 = 1,088 \cdot 10^{-3} \text{ (pu)}; \\ P_6 = 1,697 \cdot 10^{-5} \text{ (pu)} \quad e \quad Q_6 = 1,357 \cdot 10^{-4} \text{ (pu)}; \dots].$$

A potência ativa total é dada por:

$$P_t = P_0 + \sum_{k=1}^{\infty} P_{2k} = U_0 I_0 + \frac{8U_M^2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos \varphi_{2k}}{[(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} = 0,694 \text{ (pu)} \quad (5.100)$$

A potência reativa total é dada por:

$$Q_t = \sum_{k=1}^{\infty} Q_{2k} = \frac{8U_M^2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \varphi_{2k}}{[(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} = 0,051 \text{ (pu)} \quad (5.101)$$

Então a potência aparente, sem distorção harmônica, será igual a:

$$S_t = \sqrt{P_t^2 + Q_t^2} = 0,696 \text{ (pu)} \quad (5.102)$$

A potência deformante virá:

$$D_t = \sqrt{S_{tc}^2 - S_t^2} = \sqrt{0,761^2 - 0,696^2} = 0,307 \text{ pu} \quad (5.103)$$

Assim, o fator de potência parcial (não considerando a distorção harmônica), é:

$$\cos \varphi_t = \frac{P_t}{S_t} = \frac{0,694}{0,696} = 0,997; \text{ ind.} \quad e \quad \cos \varphi_1 = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = 0,6; \text{ ind.} - \text{ fator de potência}$$

relativo à 1ª harmônica, sendo o fator de distorção harmônica, dado por:

$$\cos \gamma_t = \frac{S_t}{S_{tc}} = \frac{0,696}{0,761} = 0,915; \text{ ind.} \quad (5.104)$$

E o fator de potência total com distorção harmônica:

$$\cos \varphi_{tc} = \frac{P_t}{S_{tc}} = \frac{0,694}{0,761} = 0,912; \text{ ind.} \quad (5.105)$$

Sendo a potência instantânea relativa à tensão aplicada em relação à corrente absorvida pela rede monofásica, em VA ou em pu, ver Fig. 5.18, será:

$$\left\{ \begin{array}{l} pt(\theta) = u(\theta)i(\theta) \\ pa(\theta) = \frac{U_0^2}{R} + \frac{16U_M^2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta) \cos(2k\theta - \varphi_{2k})}{[(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} \\ \text{ou: } pa(\theta) = \frac{U_0^2}{R} + \frac{8U_M^2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(4k\theta - \varphi_{2k}) + \cos \varphi_{2k}}{[(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} \end{array} \right. \quad (5.106)$$

A Fig. 5.18 representa a potência instantânea no circuito RL série, em que são apresentadas os valores torais da tensão e da corrente, em função de θ , para harmónicas de corrente retificada (onda completa – regime permanente).

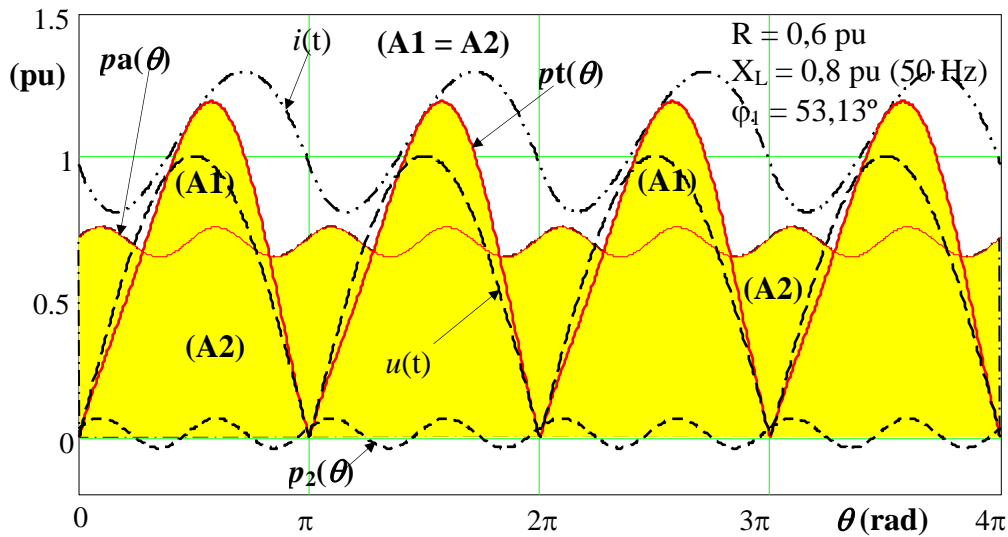


Figura 5.18 – Potência instantânea no circuito RL série – retificador de onda completa.

Da Fig. 5.18, da expressão (5.106) e para $R_j = R = 0,6$ pu, verifica-se que as áreas (A1) e (A2) são iguais, pois a potência ativa é dada por:

$$\begin{aligned} \text{De (A1): } Pt &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} u(\theta)i(\theta) d\theta = \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left[U_0 - \frac{4U_M}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta)}{(2k)^2 - 1} \right] \cdot \left\{ I_0 - \frac{4U_M}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta - \varphi_{2k})}{[(2k)^2 - 1]Z_{2k}} \right\} d\theta = 0,694 \text{ pu} \end{aligned} \quad (5.107)$$

ou por:

$$\text{De (A2): } Pt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left\{ U_0 I_0 + \frac{8U_M^2}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(2k\theta - \varphi_{2k})}{[(2k)^2 - 1]^2 Z_{2k}} \right\} d\theta = 0,964 \text{ pu} \quad (5.108)$$

Pelo que se verifica que as áreas (A1) e (A2) são iguais (ver Fig. 5.18).

Da Fig. 5.18, sendo considerada uma impedância de carga sempre constante e igual a 1 pu (à frequência de 50 Hz), a Fig. 5.19 apresenta diversos valores de corrente $i(t)$, para fatores de potência, relativos à 1ª harmónica, de $\cos \varphi_1 = 0,1; \text{ind.}$; $\cos \varphi_1 = 0,2; \text{ind.}$; $\cos \varphi_1 = 0,4; \text{ind.}$; $\cos \varphi_1 = 0,6; \text{ind.}$; $\cos \varphi_1 = 0,8; \text{ind.}$ e $\cos \varphi_1 = 1$ (resistivo puro).

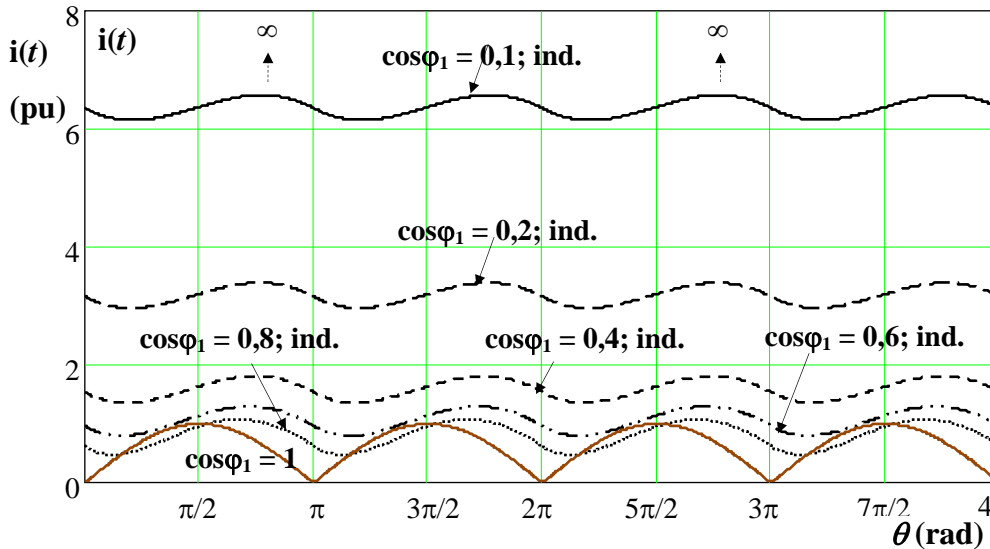


Figura 5.19 – Corrente retificada – retificador de onda completa

Da Fig. 5.19 (retificação de onda completa – regime permanente), verifica-se também que quando o circuito é indutivo puro, a corrente tende para valores muito elevados (∞).

A Fig. 5.20 apresenta a variação dos diversos fatores de potência em função de $\cos \varphi_1$. Retificação (onda completa – regime permanente) do troço de circuito RL série, para $Z_1 \equiv Z = \text{cte} = 1 \text{ pu}$ (1ª harmónica), e para 0 (indutivo puro) $< \cos \varphi_1 \leq 1$ (resistivo puro).

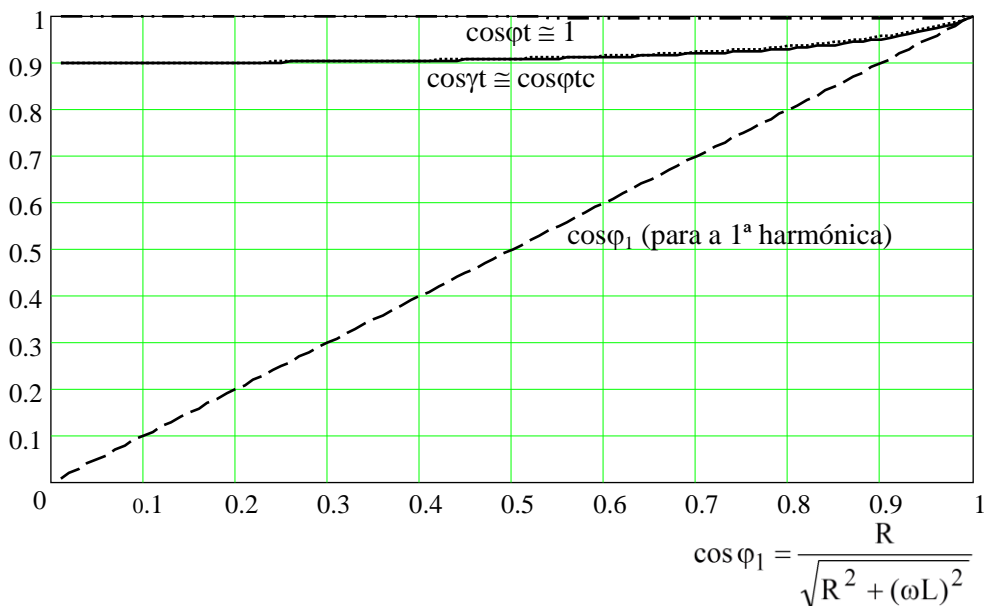


Figura 5.20 – Variação dos diversos fatores de potência em função de $\cos \varphi_1$ – retificador de onda completa.

Da Fig. 5.20, verifica-se que na rectificação de onda completa, o fator de potência total sem distorção harmónica ($\cos\phi_t$) é ainda mais próximo de 1 do que com a rectificação de meia onda, tendo o valor mínimo ($\cos\phi_{tc} \cong 0,9$) para $\cos\phi_1 \cong 0,5$.

Assim, considerando o circuito RL série ($R = 0,6$ pu e $X_L = 0,8$ pu – $\cos\phi_1 = 0,6$; ind.– 50 Hz), para um circuito sem retificação, e para as duas rectificações, meia onda e onda completa, para a mesma tensão sinusoidal aplicada de $U_M = 1$ pu ($U = 0,707$ pu – valor eficaz), a Tabela 5.1 apresenta dados comparativos entre circuitos sem retificação e com retificação.

($U = 0,707$ pu – valor eficaz; $\cos\phi_1 = 0,6$; ind. ($Z = 1$ pu))	Circuito sem retificação	Retificação de meia onda	Retificação de onda completa
U - Tensão eficaz (pu)	0,707	0,5 (0,707*)	0,707 (1**)
I - corrente eficaz (pu)	0,707	0,644 (0,91*)	1,076 (1,52**)
Pt - Potência ativa (pu)	0,3	0,249 (0,83*)	0,694 (2,31**)
Qt - Potência reativa (pu)	0,4	0,113 (0,28*)	0,051 (0,13**)
St - Pot. aparente s/ distorção (pu)	0,5	0,273 (0,55*)	0,696 (1,39**)
Stc - Pot. aparente c/ distorção (pu)	0,5	0,322(0,64*)	0,761 (1,52**)
$\cos\phi_t$ - Fator pot.s/ distorção (ind.)	0,6	0,911	0,977
$\cos\phi_{tc}$ - Fator pot.c/ distorção (ind.)	0,6	0,773	0,912
Harmónicas (cc - comp. contínua)	1ª	cc; 1ª; 2ª; 4ª; 6ª; ...	cc; 2ª; 4ª; 6ª; 8ª; ...

* - Relação grandezas da retificação de meia onda/grandezas do circuito sem retificação;

** - Relação grandezas da retificação de onda completa/grandezas do circuito sem retificação.

Tabela 5.1 – Dados comparativos entre retificação de meia onda e de onda completa ($\cos\phi_1 = 0,6$; ind.).

Também, considerando o circuito RL série ($Z = 1$ pu – $\cos\phi_1 = 0,8$; ind.– 50 Hz), para as duas retificações, meia onda e onda completa, para a tensão sinusoidal aplicada de $U_M = 1$ pu, a Tabela 5.2 apresenta dados comparativos entre circuitos sem retificação e com retificação.

(U = 0,707 pu – valor eficaz; cosφ ₁ = 0,8; ind. (Z = 1 pu)	Circuito sem retificação	Retificação de meia onda	Retificação de onda completa
U - Tensão eficaz (pu)	0,707	0,5 (0,707*)	0,707 (1**)
I - corrente eficaz (pu)	0,707	0,542 (0,91*)	0,823 (1,16**)
Pt - Potência ativa (pu)	0,4	0,235 (0,59*)	0,542 (1,08**)
Qt - Potência reativa (pu)	0,3	0,088 (0,29*)	0,054 (0,18**)
St - Pot. aparente s/ distorção (pu)	0,5	0,251 (0,50*)	0,544 (1,09**)
Stc - Pot. aparente c/ distorção (pu)	0,5	0,271 (0,54*)	0,582 (1,16**)
cosφ _t - Fator pot. s/ distorção (ind.)	0,8	0,936	0,995
cosφ _{tc} - Fator pot. c/ distorção (ind.)	0,8	0,868	0,931
Harmônicas (cc - comp. contínua)	1ª	cc; 1ª; 2ª; 4ª; 6ª; ...	cc; 2ª; 4ª; 6ª; 8ª; ...

* - Relação grandezas da retificação de meia onda/grandezas do circuito sem retificação;

** - Relação grandezas da retificação de onda completa/grandezas do circuito sem retificação.

Tabela 5.2 – Dados comparativos entre retificação de meia onda e de onda completa (cosφ₁ = 0,8; ind.).

Também, considerando o circuito RL série (Z = 1 pu – cosφ₁ = 1 – 50 Hz), para as duas retificações, meia onda e onda completa, para a tensão sinusoidal aplicada de U_M = 1 pu, a Tabela 5.3 apresenta dados comparativos entre circuito sem retificação e com retificação.

(U = 0,707 pu – valor eficaz; cosφ = 1 (Z = 1 pu)	Circuito sem retificação	Retificação de meia onda	Retificação de onda completa
U - Tensão eficaz (pu)	0,707	0,5 (0,707*)	0,707 (1**)
I - corrente eficaz (pu)	0,707	0,5 (0,707*)	0,707 (1**)
Pt - Potência ativa (pu)	0,5	0,25 (0,50*)	0,5 (1**)
Qt - Potência reativa (pu)	0	0	0
St - Pot. aparente s/ distorção (pu)	0,5	0,25 (0,50*)	0,5 (1**)
Stc - Pot. aparente c/ distorção (pu)	0,5	0,25 (0,50*)	0,5 (1**)
cosφ _t - Fator pot. s/ distorção (ind.)	1	1	1
cosφ _{tc} - Fator pot. c/ distorção (ind.)	1	1	1
Harmônicas (cc - comp. contínua)	1ª	cc; 1ª; 2ª; 4ª; 6ª; ...	cc; 2ª; 4ª; 6ª; 8ª; ...

* - Relação grandezas da retificação de meia onda/grandezas do circuito sem retificação;

** - Relação grandezas da retificação de onda completa/grandezas do circuito sem retificação.

Tabela 5.3 – Dados comparativos entre retificação de meia onda e de onda completa (cosφ₁ = 1).

Das Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, verifica-se que, nos circuitos de retificação com carga RL série (mais vulgar), o fator de potência aproxima-se mais da unidade.

Na retificação de onda completa a potência ativa posta em jogo na carga RL série é, pelo menos, igual a duas vezes a potência na retificação de meia onda.

Na retificação de onda completa o fator de potência é maior do que na retificação de meia onda.

Enquanto que a fonte sinusoidal possui apenas a 1ª harmónica de tensão e de corrente, na retificação de meia onda existe também a componente contínua e harmónicas pares. Na retificação de onda completa existem apenas a componente contínua e harmónicas pares.

No circuito RL série, se o fator de potência se aproximar de zero, as correntes absorvidas tenderão para infinito (ver Figs.5.13 e 5.19).

Na retificação com cargas capacitivas, particularmente no circuito RC série, de um modo geral a corrente tende a anular-se, na medida em que tensão aos terminais do condensador tende a manter-se contante e igual ao valor máximo da tensão da fonte.

5.3.9 SOLUÇÕES PARA ATENUAR AS HARMÓNICAS

Utilização de cargas com menores taxas de distorção harmónica

Uma das soluções mais óbvias para diminuir as taxas de distorção harmónica nas Instalações Eléctricas passa pela escolha criteriosa das cargas a alimentar. Sempre que possível devem ser utilizados equipamentos electrónicos que cumpram a normalização no que se refere às máximas taxas de distorção harmónica permitidas, e que possuam a menor taxa de distorção harmónica possível.

Dimensionamento de transformadores tendo em conta as harmónicas mais influentes

No caso de serem conhecidas as harmónicas mais influentes, a solução pode passar pela correta escolha do índice horário dos transformadores.

Diferentes índices horários dos transformadores eliminam diferentes frequências harmónicas [28]:

O conjugado Dy fixa as harmónicas de ordem 3;

O conjugado $Dz5$ fixa as harmónicas de ordem 5;

O conjugado Dyd elimina as harmónicas de ordens 5 e 7 em cada um dos secundários.

Agrupamento e posicionamento das cargas mais poluentes a montante da rede

Uma das formas mais básicas para reduzir os distúrbios causados pela distorção harmónica nas Instalações Eléctricas é limitar a sua propagação nas redes, ou seja, alimentando as cargas não lineares com maiores índices de distorção harmónica a montante da instalação, onde a potência de curto-circuito tem valores mais elevados [34].

Outra solução passa por isolar as cargas poluidoras das cargas sensíveis, não as alimentando a partir dos mesmos barramentos [29].

Também existe a possibilidade de agrupar as cargas não lineares mais poluidoras e as cargas mais sensíveis, alimentando-as por fontes distintas (diferentes transformadores) [28]. Esta solução carece de uma análise tecno-económica de forma a justificar os custos adicionais.

Escolha criteriosa dos esquemas de terra

A poluição harmónica nas instalações e a sensibilidade das cargas alimentadas deve ser um critério a ter em conta aquando da escolha do sistema de aterramento a adotarem cada instalação eléctrica.

O esquema TN-C revela alguns problemas na alimentação de cargas electrónicas sensíveis que utilizem o potencial do condutor PEN como referência. A circulação de correntes harmónicas no condutor em causa poderá aumentar o seu potencial devido à sua impedância.

Utilização de filtros passivos

Para atenuar os efeitos das harmónicas indesejáveis existem dois padrões clássicos de filtros, os “filtros passivos série” cujo princípio de funcionamento se baseia na inserção de bobinas em série com a carga e os “filtros passivos LC”, cujo princípio de funcionamento se baseia na inserção de um circuito LC em paralelo com a fonte de alimentação.

Os filtros passivos LC limitam-se a proporcionar um caminho alternativo para a circulação de correntes harmónicas, em que a indutância e o condensador são seleccionados de forma a que a impedância do filtro seja zero para a frequência que se pretende eliminar e muito pequena para as frequências próximas da mesma [35].

Utilização de filtros ativos

O princípio de funcionamento destes filtros baseia-se na análise contínua da rede em cada instante, de forma a obter o espectro harmónico para posteriormente gerar um sinal igual

à sua diferença em relação à harmónica fundamental através de um dispositivo de electrónica de potência.

6. MEMÓRIA DESCRITIVA

6.1 GENERALIDADES

Apresenta-se no presente capítulo a constituição típica de um projeto de Instalações Elétricas de BT, tendo em conta a regulamentação em vigor e os preceitos habituais.

6.2 INTRODUÇÃO

Na introdução devem ser apresentados os aspetos e objetivos principais do projeto, assim como a localização das instalações alvo de projeto. Dever-se-á também indicar se o projeto se refere a novas instalações, ou se refere à alteração ou remodelação de instalações existentes.

Deve também ser identificado o tipo de instalação de acordo com o Decreto-Lei n.º 101/2007 onde são distinguidos três tipos de instalações:

- Tipo A - Instalações de carácter permanente com produção própria, não incluídas no tipo C;
- Tipo B - Instalações que sejam alimentadas por instalações de serviço público em média, alta ou muito alta tensão;
- Tipo C - Instalações alimentadas por uma rede de distribuição de serviço público em baixa tensão ou instalações de carácter permanente com produção própria em baixa tensão até 100 kVA, se de segurança ou de socorro [36].

Caso já estejam definidos também devem ser apresentados os números de processo do distribuidor da DGE ou CERTIEL.

6.3 NORMAS E REGULAMENTOS

Neste ponto devem ser apresentadas as normas e regulamentos satisfeitos na elaboração dos projetos de Instalações Elétricas e a utilizar na execução e exploração das próprias instalações.

Deverão ser mencionadas:

- Regras Técnicas de BT;
- Decreto-Lei n.º 517/80;
- Documentos Normativos da EDP Distribuição.

Caso a instalação seja do tipo B, deve também ser apresentado:

- Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação e de Seccionamento (RSSPTS) [37];
- Normas e regulamentos específicos de acordo com a instalação projetada.

Também deve ser feita referência às determinações das seguintes entidades:

- DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia;
- Ministério da Economia e Inovação;
- CERTIEL;
- EDP Distribuição;
- Câmara Municipal do Município em causa.

Também se deverá apelar ao cumprimento da prática das Regras da Boa Arte, de forma a promover a qualidade geral das instalações.

6.4 DESCRIÇÃO E CONSTITUIÇÃO DO IMÓVEL

Neste ponto deve ser feita uma descrição sucinta acerca da constituição do imóvel a projetar. Devem ser apresentadas as características mais relevantes, tais como o número de pisos, blocos e frações, assim como o tipo de utilização a que estarão sujeitos.

No caso de se tratar de um projeto de remodelação deve-se esclarecer quais as zonas intervencionadas.

Devem ser apresentadas as zonas técnicas afetas às Instalações Elétricas e outras áreas técnicas relevantes, tais como as instalações de climatização ou extinção de incêndio.

6.5 CLASSIFICAÇÃO QUANTO ÀS INFLUÊNCIAS EXTERNAS

A segurança e as boas condições de funcionalidade das instalações dependem do seu modo de estabelecimento e da correta adaptação das características dos elementos que a constituem às condições ambientes de cada local.

Reveste-se assim de primordial importância, ao conceber a instalação, avaliar as condições ambientes dos vários locais, para que a seleção das canalizações e dos equipamentos seja a mais apropriada.

No projeto e na execução de uma instalação elétrica devem ser consideradas a codificação e a classificação das influências externas indicadas nas secções 320.2 a 323.2 das RTIEBT.

Codificação:

Cada condição de influência externa é designada por um código constituído sempre por um grupo de duas letras maiúsculas e de um algarismo, colocado pela ordem seguinte:

- A primeira letra caracteriza a categoria geral das influências externas:
 - A - Ambientes;
 - B - Utilizações;
 - C - Construção dos edifícios.
- A segunda letra caracteriza a natureza da influência externa de acordo com as RTIEBT;
- O algarismo caracteriza a classe de cada uma das influências externas de acordo com as RTIEBT.

6.6 ENTREGA DE ENERGIA ELÉTRICA

É fundamental descrever quais as formas de alimentação das Instalações Elétricas projetadas. A alimentação poderá ser feita através das seguintes formas:

- Através de um ou mais ramais de BT da distribuidora;
- Através de uma ou mais instalações de produção independente, como o caso das instalações alimentadas por um grupo gerador ou através de energias renováveis.

Devem ser apresentados os níveis de tensão das instalações, assim como as potências a instalar.

No caso das instalações alimentadas através de ramais em MT da distribuidora devem ser descritas as características gerais dos postos de seccionamento, ou do posto de seccionamento e transformação a instalar, tais como:

- A localização;
- O tipo de alimentação, em antena ou em anel;
- O destino das saídas do posto de seccionamento;
- O tipo e número de celas a instalar e reservas disponíveis.

No caso das instalações alimentadas em BT deverá ser apresentado:

- A localização e características das portinholas no caso de existirem;
- As normas da distribuidora a serem cumpridas na sua instalação.

É essencial referir também qual o nível de tensão e a frequência a utilizar.

6.7 CONTAGEM DE ENERGIA ELÉTRICA

Neste ponto deverão ser descritas as formas de contagem de energia elétrica.

Nas instalações alimentadas em MT, a medição poderá ser realizada também em média tensão, através de transformadores de intensidade e de tensão instalados numa cela de medição dedicada, ou em BT por intermédio de transformadores de intensidade instalados no painel de entrada do QGBT. A medição só poderá ser feita em BT se forem cumpridos os parâmetros da distribuidora, nomeadamente no que diz respeito à potência a instalar.

Quando as instalações forem alimentadas em BT, a contagem de energia poderá ser realizada de forma direta pelo contador para potências iguais ou inferiores a 41,4 kVA, e de forma indireta para potências superiores.

Deverão ser apresentadas as características das caixas destinadas a alojar os contadores e transformadores de intensidade. Estas deverão ser prescritas em concordância com as normas e regulamentos da distribuidora.

6.8 DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

É essencial realizar um capítulo onde seja descrita a forma como é feita a distribuição de energia elétrica desde a origem das instalações, nos pontos de entrega de energia, até aos pontos terminais da alimentação dos aparelhos de utilização, ou dos equipamentos elétricos alimentados por canalizações fixas, ou de tomadas para a alimentação de equipamentos.

No caso de se preverem redes de segurança e ou socorro, devem ser referenciadas as suas fontes como é o caso de UPS's ou grupos eletrogéneos. Neste caso é imperativo expor as condições de funcionamento, de arranque e cargas alimentadas.

6.9 CORTES DE ENERGIA ELÉTRICA

Realizar cortes de energia elétrica é uma ação indispensável em caso de incêndio. É necessário prever e descrever a forma como são feitos os cortes de energia nas condições descritas nas RTIEBT, e de acordo com o regulamento de segurança contra incêndios, como tal devem ser descritos os princípios básicos de funcionamento do sistema a instalar.

6.10 QUADROS ELÉTRICOS

Sendo os quadros elétricos elementos fulcrais nas Instalações Elétricas, devem ser feitas referências em relação às suas características técnicas, localização e índices de proteção (IP e IK).

6.11 COMPENSAÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Devem ser feitas referências em relação à compensação de fator de potência para instalações com potência instalada acima de 41,4 kVA.

Deve apresentar-se qual o valor da compensação a adicionar e as principais características do equipamento a instalar.

É comum optar-se por não projetar logo à partida a bateria de condensadores a instalar, optando-se por fazer o estudo após a instalação estar a funcionar. Neste caso devem ser salvaguardados espaços de reserva para os equipamentos.

6.12 INSTALAÇÕES DE TOMADAS E ALIMENTAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

6.12.1 TOMADAS

Na realização do projeto devem ser apresentadas as características gerais das tomadas a utilizar nas instalações elétricas e quais os tipos de montagem a que estarão sujeitos.

As tomadas monofásicas utilizadas em Portugal são, por norma, do tipo “SCHUKO” 250V/16A com alvéolos protegidos.

Salientam-se os seguintes modos de montagem mais habituais:

- Embebida;
- À vista;
- Em caixa de pavimento;
- Em rodapé técnico.

No caso de as instalações preverem tomadas alimentadas através de uma rede de socorro, deve referir-se que as mesmas deverão ser identificadas pela cor vermelha do espelho.

É fundamental realçar que as tomadas deverão sempre possuir índices de proteção (IP e IK) adequados ao local onde serão instaladas.

6.12.2 TOMADAS DO TIPO INDUSTRIAL

É necessário também descrever a utilização de tomadas industriais.

Em certas instalações, nomeadamente em instalações de carácter industrial é exigido a utilização tomadas trifásicas e ou com índices de proteção mais elevados. Devem ser utilizadas tomadas dos seguintes tipos:

- Tipo CEE 17, 230V–50 Hz;
- Tipo CEE 17, 230/400V– 50Hz.

Deve ser referido a quantidade e tipo de polos que cada tomada possui.

Caso existam zonas classificadas com risco de explosão, devem ser utilizadas tomadas adequadas a esses ambientes.

6.12.3 CIRCUITOS DE TOMADAS E ALIMENTAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Deverão ser apresentadas as características das canalizações elétricas destinadas às tomadas no que se refere aos métodos de referência utilizados em cada local, secção das tubagens, tipo de condutores ou cabos a utilizar e suas respectivas secções. Será também importante fazer referência aos dispositivos de proteção desses mesmos circuitos.

6.13 CANALIZAÇÕES

6.13.1 CAIXAS E CALHAS DE PAVIMENTO

Caso esteja prevista a utilização de caixas e calhas de pavimento, estas devem ser descritas no que se refere ao tipo de montagem, número de tomadas e possíveis interferências com outras especialidades, como o caso das comunicações.

6.14 UPS's

No caso da instalação possuir redes de socorro ou de segurança, alimentadas por UPS's, devem ser descritas no projeto as principais características das mesmas, assim como as normas que deverão respeitar.

Devem ser descritas as principais características dos sistemas a utilizar, nomeadamente:

- As características do retificador, nomeadamente a sua potência;
- As características do banco de baterias, em que se destaca a tecnologia das mesmas e a sua autonomia;
- As características do inversor.

6.15 ILUMINAÇÃO DE SEGURANÇA

Os estabelecimentos recebendo público devem, segundo as RTIEBT, ser munidos de iluminação de segurança.

Na iluminação de segurança, que deve permitir, em caso de avaria da iluminação normal, a evacuação segura e fácil do público para o exterior e a execução das manobras respeitantes à segurança, e à intervenção dos socorros, o seu estudo está incluído nas RTIEBT, ou seja:

- A iluminação de circulação: obrigatória em locais onde possam permanecer mais de 50 pessoas, assim como nos corredores e caminhos de evacuação;
- A iluminação de ambiente: obrigatória para os locais onde possam permanecer mais do que 100 pessoas, acima do solo (rés do chão e pisos superiores), ou mais do que 50 pessoas, no subsolo.

Deve ser exposto, na memória descritiva e justificativa, se o edifício inclui iluminação de circulação, assim como iluminação ambiente.

Também é fundamental caracterizar o tipo de iluminação de segurança a utilizar, e apresentar a categoria do estabelecimento em função da sua lotação.

A lotação dos edifícios deve ser determinada a partir do somatório do número de ocupantes potenciais de todos os espaços susceptíveis de ocupação.

Segundo as RTIEBT, estão definidas 5 categorias de classificação de lotação:

Categoria	Lotação (N)
1 ^a	$N > 1000$
2 ^a	$500 < N \leq 1000$
3 ^a	$200 < N \leq 500$
4 ^a	$50 < N \leq 200$
5 ^a	$N \leq 50$

Tabela 6.1 – Classificação dos estabelecimentos em função da lotação.

O cálculo da lotação deve ser efetuado de forma específica para cada tipo de estabelecimento (secções 801.2.2 a 801.2.9 das RTIEBT), e de acordo com a secção 801.2.0 das RTIEBT.

O tipo de iluminação de segurança a utilizar, é definido de acordo com a utilização do estabelecimento recebendo público e da sua categoria.

Assim, estão definidos os seguintes tipos de iluminação de segurança:

- A. Alimentação a partir de uma fonte central (bateria de acumuladores ou grupo gerador acionado por motor de combustão);
- B. Alimentação a partir de fonte central (bateria de acumuladores ou grupo gerador acionado por motor de combustão) ou pode ser constituída por blocos autónomos do tipo permanente;
- C. Alimentação a partir de uma fonte central (bateria de acumuladores ou grupo gerador acionado por motor de combustão), ou pode ser constituída por blocos autónomos do tipo permanente ou não permanente;
- D. Alimentação por lanternas portáteis, alimentadas por pilhas ou por baterias, colocadas à disposição do pessoal responsável pela segurança do estabelecimento.

Devem ser referidas, na memória descritiva e justificativa, regras a cumprir para o respetivo tipo de iluminação de segurança de acordo com a secção 801.2.1.5.3.4 das RTIEBT.

6.15.1 CIRCUITOS DE ILUMINAÇÃO DE SEGURANÇA

Deverão ser apresentadas as características das canalizações elétricas destinadas aos aparelhos de iluminação de segurança no que se refere aos métodos de referência utilizados em cada local, secção das tubagens, tipo de condutores ou cabos a utilizar, e suas respetivas secções.

No caso de ser utilizada uma fonte central, é essencial referir que serão utilizadas canalizações distintas resistentes ao fogo e separadas das restantes canalizações.

Será também importante fazer referência aos dispositivos de proteção desses mesmos circuitos.

6.16 INSTALAÇÕES DE ILUMINAÇÃO

6.16.1 LUMINÁRIAS

Deve ser apresentado na memória descritiva e justificativa, quando definidos os tipos de aparelhos de iluminação a instalar em cada local, assim como características básicas tais como o tipo de lâmpada, temperatura de cor, índices de proteção e classes de isolamento.

Quando a definição dos aparelhos de iluminação ficar a cargo da arquitetura, fiscalização ou do dono de obra, ou existir um projeto de luminotecnica, deverá ser indicado, na memória descritiva e justificativa, que os mesmos deverão ser selecionados de acordo com os índices de proteção mínimos, e classes de isolamento de acordo com o exigido no projeto para cada local.

As instalações de iluminação deverão ser calculadas com base nos níveis luminosos adequados a cada local que deverão ser apresentados.

Também deve ser apresentado o coeficiente de depreciação utilizado relativamente aos valores de iluminação recomendados, para compensação do envelhecimento e acumulação de poeiras.

6.16.2 CIRCUITOS DE ILUMINAÇÃO

Deverão ser apresentadas as características das canalizações elétricas destinadas aos aparelhos de iluminação no que se refere aos métodos de referência utilizados em cada local, secção das tubagens, tipo de condutores ou cabos a utilizar e suas respectivas secções. Será também importante fazer referência aos dispositivos de proteção desses mesmos circuitos.

6.17 PROTEÇÃO CONTRA CONTACTOS INDIRETOS

A memória descritiva e justificativa deverá ter um capítulo onde sejam apresentadas as medidas de proteção contra contactos indirectos, de acordo com a secção 413 das RTIEBT.

Nas RTIEBT estão definidas 5 formas de proteção contra contactos indirectos. A sua aplicação varia de acordo com a instalação e o próprio sistema de terras a adotar.

- Proteção por corte automático da alimentação;
- Proteção por utilização de equipamentos da classe II ou por isolamento equivalente;
- Proteção por recurso a locais não condutores;
- Proteção por ligações equipotenciais locais não ligadas à terra;
- Proteção por separação elétrica.

6.17.1 PROTEÇÃO CONTRA CONTACTOS INDIRETOS DAS INSTALAÇÕES ESPECIAIS

Geralmente o projeto de Instalações Elétricas não contempla as instalações especiais, como por exemplo:

- Ar condicionado e ventilação;
- Segurança;
- Elevadores;
- Águas e esgotos.

É importante apresentar no projeto de Instalações Elétricas, as medidas a adotar nas respectivas instalações.

6.17.2 INSTALAÇÕES E LOCAIS ESPECIAIS

Deverão ser apresentados na memória descritiva e justificativa as medidas adicionais de segurança a adotar nas instalações, contendo duches e chuveiros e/ou piscinas ou lagos.

6.18 PROTEÇÃO CONTRA CONTACTOS DIRETOS

Deve também ser apresentado um capítulo onde sejam enunciadas as medidas de proteção a adotar contra os contactos diretos.

Nas RTIEBT estão definidas 5 formas de proteção contra contactos diretos. A sua aplicação varia de acordo com a instalação, ou seja:

- Proteção por isolamento das partes ativas;
- Proteção por meio de barreiras ou de invólucros;
- Proteção por meio de obstáculos;
- Proteção por colocação fora de alcance;
- Proteção complementar por dispositivos de proteção sensíveis à corrente diferencial-residual (abreviadamente dispositivos diferenciais).

6.19 PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES

Se necessário, devem ser tomadas medidas para proteger as instalações elétricas contra as consequências perigosas das sobretensões que as possam afetar.

Assim devem ser descritas na memória descritiva e justificativa as medidas de proteção contra sobretensões a adotar, nomeadamente o tipo de descarregadores de sobretensões a adotar em cada quadro elétrico.

6.20 REDE DE TERRAS

Deve ser descrito na memória descritiva e justificativa o sistema de rede de terras a adotar e as suas respetivas características, nomeadamente o seu valor máximo de resistência.

Os valores máximos da resistência de terra dos elétrodos são os indicados, nas secções 413.1.3.5, 413.1.3.7, 413.1.4.2, 413.1.5.3 e 531.1.2 das RTIEBT (conforme o caso).

6.21 SISTEMA DE CAPTAÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Caso esteja previsto um sistema de captação contra descargas atmosféricas, devem ser enunciadas as características do mesmo, nomeadamente a sua classe de proteção.

6.22 ENSAIOS

De forma a salvaguardar a qualidade das instalações projetadas, e de acordo com as RTIEBT, dever-se-á mencionar que as Instalações Elétricas deverão ser objeto de verificação e ensaios.

A verificação servirá para garantir a operacionalidade e o correto funcionamento da instalação, antes da sua entrada em exploração.

Os ensaios deverão incluir os pontos que se indicam a seguir (quando aplicáveis):

- Verificação e ensaio das proteções contra sobreintensidades;
- Verificação e ensaio das proteções contra contactos indirectos;
- Medição da resistência de terra das massas;
- Verificação da possibilidade de desenfiamento e enfiamento de condutores isolados ou cabos em tubos ou condutas;
- Verificação da ligação efetiva à terra de todas as massas metálicas normalmente sem tensão;
- Verificação da continuidade dos circuitos de terra;
- Verificação da ligação dos equipamentos à terra;
- Verificação do aperto mecânico dos ligadores;
- A inspeção do quadro que inclui a verificação da cablagem, e se necessário, um ensaio de funcionamento elétrico;
- Ensaio dielétrico;
- Verificação do comportamento mecânico;
- Verificação da resistência de isolamento;
- Verificação das medidas de proteção e de continuidade elétrica do circuito de proteção.

6.23 SUBESTAÇÕES

É necessário elaborar um capítulo referente aos postos de transformação e seccionamento nas instalações do tipo B, ou seja, instalações que sejam alimentadas por outras instalações de serviço público em MT onde devem ser descritos.

Características gerais

É fundamental descrever o tipo local de implantação dos postos de transformação e seccionamento, mencionando também o tipo de celas a utilizar.

Distinguem-se 3 tipos de postos de transformação e seccionamento:

- Aéreos;
- Subterrâneos;
- Cabina.

As celas de MT poderão ser do tipo:

- Compactas;
- Convencionais.

Características construtivas

É também importante descrever as características construtivas dos postos de transformação e seccionamento a implantar tais como os tipos de construção, dos quais se podem destacar os pré-fabricados e os construídos em alvenaria.

Devem também ser feitas referências às dimensões no que diz respeito ao pé direito da edificação, e largura para manuseio dos equipamentos elétricos, assim como às dimensões e características das portas, janelas e grelhas a utilizar de acordo com o Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação e de Seccionamento (RSSPTS).

No âmbito da construção civil devem ser mencionadas as condições de execução das caleiras e das malhas de terra de proteção, a embeber na própria construção, para evitar diferenças de potencial no interior do PT.

Características e descrição do sistema de alimentação

Deve ser descrita a proveniência da alimentação de cada posto de transformação e seccionamento, sendo importante apresentar o nível de tensão, frequência e potência de curto-circuito.

Aparelhagem de média tensão

As características da aparelhagem de MT deverão ser expostas, nomeadamente as características construtivas das celas de MT e respetivo barramento, assim como as características dos transformadores a utilizar e respetivos dispositivos de proteção.

É também importante apresentar as condições e características das canalizações de ligação ao primário e secundário dos transformadores.

Contagem de energia elétrica

Deve ser mencionada a forma como é feita a contagem de energia elétrica de acordo com as imposições da distribuidora. A contagem pode ser realizada em MT utilizando transformadores de tensão e de corrente instalados numa cela de medição de MT, ou em BT a jusante do transformador, no QGBT por intermédio de transformadores de tensão e de corrente.

Aparelhagem de baixa tensão

Os disjuntores de BT responsáveis pela proteção dos transformadores devem ser caracterizados.

Ligação à terra de proteção

Devem ser mencionados os elementos metálicos da instalação, que normalmente não estão em tensão, devem ser ligados à terra de proteção.

Esquema de ligação à terra de proteção e terra de serviço

Deve ser apresentado o esquema de terras a adotar na BT e as condições de ligação do neutro à terra de serviço.

Também deve ser mencionado se é requerido a utilização de terras únicas ou separadas (terra de proteção e terra de serviço).

Instalações secundárias

Deve-se requerer a elaboração de um descritivo das instalações luminotécnicas, incluindo o sistema de iluminação de segurança a instalar no interior dos postos de transformação e seccionamento. É também fundamental descrever os mecanismos de proteção contra incêndios a serem instalados, o que deve ser feito em articulação com as respetivas especialidades.

Ventilação e climatização

É importante mencionar qual o tipo de ventilação e ou climatização a adotar.

Medidas de proteção

Para assegurar a proteção das pessoas devem ser descritos os dispositivos de encravamento e proteção a adotar.

7. FERRAMENTA DE APOIO À EXECUÇÃO DE PROJETOS ELÉTRICOS DE BAIXA TENSÃO

7.1 GENERALIDADES

O objetivo deste capítulo é apresentar uma ferramenta de cálculo e dimensionamento de Instalações Elétricas de BT desenvolvida.

A aplicação foi desenvolvida de acordo com as RTIEBT, seguindo sempre as normas internacionais sempre que existia indefinições nas condições de cálculo.

Os cálculos foram feitos segundo os princípios enunciados no capítulo 4.

O software selecionado para a execução da aplicação foi o Microsoft Excel devido à sua versatilidade, e facilidade de manuseamento ou adaptação a casos específicos não contemplados, sendo possível a alteração ou adaptação pela maioria dos técnicos projetistas.

Os principais objetivos da ferramenta de cálculo são um auxiliar aos projetistas na elaboração de todos os cálculos afetos às Instalações Elétricas de BT.

A ferramenta de cálculo é constituída fundamentalmente por 5 folhas de Excel apresentadas adiante.

7.2 TRANSFORMADORES

A folha de cálculo, referente à alimentação através de transformadores, permite receber os dados referentes às características da alimentação de MT, nomeadamente:

- Tensão de alimentação [V];
- Potência máxima e mínima de curto-circuito da rede [MVA].

Permite também receber as características do transformador a instalar nomeadamente:

- Nível de tensão do lado da BT [V];
- Potência do transformador [kVA];
- Número de transformadores em paralelo [adimensional];
- Tensão de curto-circuito do transformador [%].

Esta folha de cálculo, através dos dados recebidos, efetua o cálculo dos seguintes valores através das fórmulas explicitadas no capítulo 4.

- Impedância, resistência e reactância máximas da rede medidas do lado da BT [$m\Omega$];
- Impedância, resistência e reactância máximas dos transformadores medidas do lado da BT [V];
- Corrente máxima de curto-circuito trifásica $I_{K3máx}$ [kA];
- Corrente de serviço na MT;
- Corrente de serviço na BT.

Os valores calculados são remetidos e utilizados no cálculo das canalizações a jusante realizado pelas folhas referentes às canalizações e quadros.

7.3 GERADORES

A folha de cálculo, referente à alimentação através de Geradores, permite receber os dados referentes às suas características da alimentação de, nomeadamente:

- Potência [kVA];
- Número de geradores em paralelo [adimensional];
- Tensão [V];
- Reactância síncrona [%];
- Reactância assíncrona [%].

Esta folha de cálculo, através dos dados recebidos, efetua o cálculo dos seguintes valores através das fórmulas explicitadas no capítulo 4.

- Impedância, resistência e reactância máximas dos geradores [$m\Omega$];
- Corrente máxima de curto-circuito trifásica $I_{K3máx}$ [kA].

Os valores calculados são remetidos e utilizados no cálculo das canalizações a jusante realizado pelas folhas referentes às canalizações e quadros.

7.4 CARACTERÍSTICAS DOS CONDUTORES

Esta folha de cálculo serve de base de dados referentes às características dos cabos e condutores, em relação às correntes máximas admissíveis (I_z), tendo em conta as características da alma condutora e os métodos de referência. Os parâmetros introduzidos referem-se a:

- Material da alma condutora (Alumínio/Cobre);
- Número de fases da canalização (Monofásico/Trifásico);
- Configuração da canalização (Monocondutores/Multicondutores);
- Secção da alma condutora [mm^2];
- Corrente máxima admissível na canalização I_z [A];
- Ao material do isolamento (PVC/XPLE/Mineral);
- Método de referência da instalação segundo as RTIEBT;
- Número da tabela das RTIEBT.

Os dados apresentados na presente folha de cálculo foram obtidos nas RTIEBT, sendo possível também acrescentar no final novos condutores com correntes máximas admissíveis (I_z) não constantes nas RTIEBT.

7.5 QUADROS ELÉTRICOS E CARGAS

Nesta folha de cálculo é necessário introduzir a nomenclatura dada a cada quadro elétrico e a cada carga.

É também necessário introduzir as características das cargas a alimentar no que se refere:

- Ao número de instalações [adimensional];
- À potência unitária de cada instalação [kVA];
- Ao coeficiente de simultaneidade [adimensional];
- Ao número de fases do circuito (monofásico/trifásico) [adimensional];
- Ao fator de potência ($\cos\phi$) [adimensional];
- Tensão de alimentação [V].

Em relação às características de corte do quadro/equipamento e características do barramento:

- Tipo de corte geral (sem corte/Interruptor/Disjuntor);
- Calibre do órgão de corte e respetiva curva, quando aplicável [A].

São apresentados os valores calculados na folha referente às canalizações no que se refere:

- Corrente máxima de curto-circuito trifásica (I_{K3max}), bifásica (I_{K2max}) e monofásica (I_{K1max}) [A];
- Corrente mínima de curto-circuito trifásica (I_{K3min}), bifásica (I_{K2min}) e monofásica (I_{K1min}) [A];
- Queda de tensão acumulada [%];
- Corrente de defeito [kA].

É ainda realizada a verificação da densidade de corrente dos barramentos.

7.6 CANALIZAÇÕES E PROTEÇÕES

Nesta folha de cálculo é necessário introduzir a nomenclatura dada entre o ponto de origem e o destino de cada canalização a dimensionar, de acordo com as folhas referentes aos quadros e equipamentos a alimentar, transformadores e geradores.

É também necessário introduzir a características das cargas a alimentar no que se refere às características da canalização, no que se refere:

- Ao número desejado de condutores de fase, neutro e terra em paralelo [adimensional];
- À secção desejada da alma condutora dos condutores de fase, neutro e terra [mm^2];
- Comprimento [m];
- Ao material da alma condutora (Alumínio/Cobre);
- Número de fases da canalização (Monofásico/Trifásico);
- Configuração da canalização (Monocondutores/Multicondutores);
- Ao material do isolamento (PVC/XPLE/Mineral);
- Agrupamento de condutores;

- Método de referência da instalação segundo as RTIEBT;
- Fatores de agrupamento;
- Designação da canalização.

No que se refere às características dos equipamentos de proteção devem ser inseridos:

- O tipo de proteção (disjuntor/fusível);
- O tipo de curva e regulação dos dispositivos de protecção.

A tabela, através da análise dos dados inseridos irá verificar o cumprimento da regulamentação e normalização, nomeadamente:

- Proteção contra as sobrecargas ($I_B \leq I_N \leq I_Z$ e $I_2 \leq 1,45I_Z$)
- Proteção contra os contactos indirectos;
- Verificação das características térmicas dos condutores.

Esta folha de cálculo, através dos dados recebidos, efetua o cálculo dos seguintes valores através das fórmulas explicitadas no capítulo 4.

- Impedância, resistência e reatância máximas dos geradores [$m\Omega$];
- Corrente máxima de curto-circuito trifásica (I_{K3max}), bifásica (I_{K2max}) e monofásica (I_{K1max}) [kA];
- Corrente de defeito (I_f) [kA];
- Tempo máximo admissível para atuação das proteções [s];
- A corrente instantânea de corte [A];
- O valor das resistências e reatâncias lineares dos condutores de fase, neutro e terra a utilizar no cálculo da corrente de curto-circuito máxima, corrente de curto-circuito mínima, corrente de defeito, e da queda de tensão.

7.7 BASE DE DADOS

Esta folha de cálculo é utilizada como base de dados, nela estão definidas várias características pré-definidas das canalizações e proteções, nomeadamente:

- Os calibres dos disjuntores utilizados comercialmente e a sua respetiva corrente de funcionamento (I_2);

- Os calibres dos fusíveis utilizados comercialmente e a sua respetiva corrente de fusão (I_2);
- As curvas de regulação térmicas utilizadas comercialmente;
- As tensões nominais geralmente utilizadas;
- As secções comerciais das almas condutoras geralmente utilizadas;
- Os fatores de correção da corrente máxima admissível em função da temperatura de acordo com as RTIEBT;
- O valor das resistividades do cobre e do alumínio.

8. EXEMPLO PRÁTICO

8.1 GENERALIDADES

O objetivo deste capítulo é apresentar a ferramenta de cálculo desenvolvida, demonstrando um exemplo prático de dimensionamento.

Foram realizados múltiplos testes à ferramenta de cálculo, sendo esta responsável por vários dimensionamentos de Instalações Elétricas já executados a nível profissional.

O exemplo de cálculo aqui apresentado é baseado no relatório 15L 187 de certificação do software “My Ecodial L 3.35” na UTE, um organismo independente de controlo de forma a poder validar os cálculos efetuados.

Os resultados calculados pela tabela aproximam-se, de uma forma bastante razoável, dos valores calculados no relatório 15L 187 disponibilizado na ferramenta “My Ecodial L” da Schneider. O exemplo apresentado adiante serviu para verificação experimental dos resultados dados pela ferramenta.

8.2 EXEMPLO DE CÁLCULO

O circuito simulado na ferramenta de cálculo, foi o indicado na Fig. 8.1.

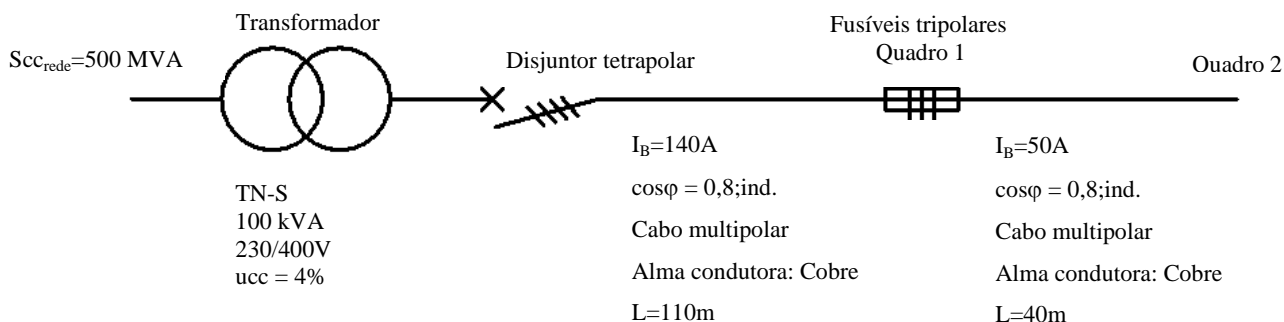


Figura 8.1 – Circuito simulado na ferramenta de cálculo ($S_{cc,rede}$ – potência de c.c. a montante da rede e u_{cc} – tensão de c.c. em percentagem).

Expõem-se adiante os resultados apresentados pela ferramenta de cálculo.

A ferramenta de cálculo desenvolvida tem o objectivo de aceitar e processar as características relacionadas com as instalações, de forma a dimensionar as proteções e canalizações de Instalações Eléctricas de baixa tensão.

A apresentação das tabelas foi adaptada de forma a se enquadrar a nível de formatação no presente trabalho.

8.2.1 EXEMPLO DE CÁLCULO - TRANSFORMADORES

A Tabela 8.1 tem o objectivo de acolher as características relacionadas com a origem da instalação de forma a calcular as impedâncias, resistências e reatâncias a utilizar nos cálculos de dimensionamento.

Designação Transformador	Nº Transf. Paralelo [adim.]	S _{IG} - Pot. Est. Grupo [kVA]	Tensão de c.c. [u%]	Nível de Tensão de MT [kV]	Potência Máxima de c.c. da Rede MT [MVA]	Potência Mínima de c.c. da Rede MT [MVA]	m - Fator de carga em vazio	Nível Tensão Trif. BT [V]	Z _{Qmax} - Impedância da Rede (c.c. min) [mΩ]	X _{Qmax} - Reatância da rede (c.c. min) [mΩ]	R _{Qmax} - Resistência da rede (c.c. min) [mΩ]	Z _{Qmin} - Impedância da Rede (c.c. max) [mΩ]	X _{Qmin} - Reatância da rede (c.c. max) [mΩ]	R _{Qmin} - Resistência da rede (c.c. max) [mΩ]	Z _T - Impedância do Transformador [mΩ]	R _T - Resistência do Transformador [mΩ]	X _T - Reatância do Transformador [mΩ]	Sistema de Aterramento
Transf. 1	1	100	4	15	500	500	1,05	400	0,35	0,35	0,04	0,35	0,35	0,04	70,6	21,9	67	TN-S

Tabela 8.1 – Tabela de dimensionamento de transformadores.

8.2.2 EXEMPLO DE CÁLCULO - QUADROS ELÉTRICOS E CARGAS

O objectivo da Tabela 8.2 é de acolher as características relacionadas com os quadros eléctricos e as várias cargas alimentadas pela instalação de forma calcular as variáveis necessárias para o dimensionamento de canalizações e proteções.

Carga	Características da Carga										Corte	Pdc	q.d.t	Corr. c.c.							
	Tipologia da Carga	Sistema de Aterramento	Nº Instalações [adim.]	Potência Unitaria [kVA]	Coef. Simultânieidade	Nº Fases (Tri/Mon/Bif)	Tensão Monofásica [V]	cos φ - Fat. Pot	T _{HD1} - Taxa de distorção Harmónica da corrente [%]	Potência Total (kVA)				I _{b fase} - Corrente de Serviço no condutor de fase [A]	I _{b neutro} - Corrente de Serviço no condutor neutro [A]	Corrente de Arranque [A]	Disp. de Corte (interruptor/disjuntor)	Calibre Mín. do Dispositivo de Corte Geral [A]	Pdc - Pod. corte painel [kA]	Verificação - P _{dc} > I _{c,cmáx}	Queda tensão no painel [V]
Quadro 1	Quadro	TN-S	1	97	1	Tri	230	0,8	<15%	97	140	140	140	Int.	160	4,5	OK	9,08	3,95	2,29	1,05
Quadro 2	Quadro	TN-S	1	35	1	Tri	230	0,8	<15%	35	50	50	50	Int.	63	4,5	OK	11,40	4,95	1,70	0,67

Tabela 8.2 – Tabela de dimensionamento de quadros eléctricos e cargas.

8.2.3 EXEMPLO DE CÁLCULO - CANALIZAÇÕES E PROTEÇÕES

A Tabela 8.3 agora apresentada tem o objectivo de dimensionar todas as canalizações e proteções envolvidas na alimentação dos quadros eléctricos e cargas das instalações.

Origem e Destino		Carga da Canalizações					Definição das Características dos dispositivos de Protecção						Verificação da Protecção							
Origem da Canalização	Destino da Canalização	Sistema de Aterramento	Nº Fases (Tri/Mon/Bif)	Potência Total [kVA]	I_{base} - Corrente de Serviço no Condutor de Fase [A]	I_{neutro} - Corrente de Serviço no Condutor Neutro [A]	I_n - Corrente Estipulada do Dispositivo de Protecção [A]	I_{zcorr} - Corrente Admissível na Canalização [A]	I_z - Corrente Convencional de funcionamento Disp. Prot. [A]	$1,45 \times I_{zcorr}$ [A]	Disp. de Protecção	Curva do disp. de protecção	Corrente de Corte Instantâneo da Protecção [A]	Corrente de Arranque [A]	Protecção Diferencial [mA]	Verificação da Protecção contra Contactos Indirectos	$I_{conite} (Disp. Prot.) > I_{arr}$ - Verificação	$I_b < I_n < I_z$ [A] - Verificação	$I_z < 1,45 I_z$ [A] - Verificação	$I_{cc min} > I_{conite}$ [A]
Transf. 1	Quadro 1	TN-S	Tri	97	140	140	160	104	208	238,3	Disj.	B	800	140	2000	OK	OK	OK	OK	OK
Quadro 1	Quadro 2	TN-S	Tri	35	50	50	63	85	101	123,0	Fus.	gG	440	50	10	OK	OK	OK	OK	OK

Origem e Destino		Características das Canalizações																			
Origem da Canalização	Destino da Canalização	Seção Condutor Fase [mm ²]	Seção condutor Neutro [mm ²]	Seção condutor Terra [mm ²]	Número cond. de Fase [Adim.]	Número condutores Neutro [Adim.]	Número Condutores Terra [Adim.]	Comprimento Canalização [m]	Número de fases [Adim.]	Agrupamento de Condutores	Tipologia de Instalação	Método de Instalação [RTIEBT]	Método de Referência [RTIEBT]	Material da alma condutora	Material de Isolamento dos Condutores	Temperatura ambiente/solo [°C]	Nº Cond. Agrup. Suplem. [Adim.]	Nº Camadas/cam. cabos [Adim.]	Fator correção de Segurança	Fator de Correção Total	I_{zcorr} - Corrente Admissível na Canalização [A]
Transf. 1	Quadro 1	35	25	25	1	1	1	110	Tri	Cabos Mult.	Fix. Direta	15	E	Cu	XPLE	25	0	1	1	1,00	158
Quadro 1	Quadro 2	16	16	16	1	1	1	40	Tri	Cabos Mult.	Sem fix.	15	E	Cu	PVC	25	0	1	1	1,00	158

Origem e Destino		Correntes de Curto-circuito						Quedas de Tensão			Reg. Adm. Proteções	
Origem da Canalização	Destino da Canalização	$I_{k3 max}$ - Corr. de Curto-circuito máxima trifásica [kA]	$I_{k2 max}$ - Corr. de Curto-circuito máxima bifásica [kA]	$I_{k1 max}$ - Corr. de Curto-circuito máx. monofásica [kA]	$I_{k2 min}$ - Corr. de Curto-circuito mín. bifásica [kA]	$I_{k1 min}$ - Corr. de Curto-circuito mín. monofásica [kA]	I_f - Corrente de defeito [A]	Queda de Tensão Troço [%]	Queda de Tensão Montante [%]	Queda de Tensão Total [%]	Máximo Tempo de Corte de Corrente de Fase [s]	Máximo Tempo de Corte Cond. de Protecção PE/PEN [s]
Transf. 1	Quadro 1	2,29	1,99	1,39	1,62	1,05	1053	0,00	2,00	3,95	11,53	11,53
Quadro 1	Quadro 2	1,70	1,47	0,94	1,26	0,67	673	3,95	0,40	4,95	13,57	13,57

Tabela 8.3 – Tabela de dimensionamento de canalizações e proteções.

9. OBSERVAÇÕES, CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

9.1 ANÁLISE DO TRABALHO EFETUADO

O presente trabalho consistiu no culminar da minha formação académica, permitindo-me aprofundar os conhecimentos adquiridos ao longo da minha formação académica, e adquirir conhecimentos profissionais. A ferramenta desenvolvida permitiu aumentar bastante a minha produtividade na elaboração de cálculos, permitindo também aumentar a minha confiança nos cálculos realizados.

De acordo com o subcapítulo referente à motivação, o objetivo primordial do presente trabalho foi a elaboração de uma ferramenta que auxilie os projetistas de Instalações Elétricas no dimensionamento de instalações de BT.

De acordo com os objetivos, a aplicação desenvolvida permite aos projetistas realizarem dimensionamentos de acordo com as RTIEBT, cumprindo os requisitos da normalização europeia. Ao longo deste trabalho concluiu-se que não seria prático o desenvolvimento de uma ferramenta que realiza a seleção de equipamentos de forma automática, permitindo assim que o projetista possa realizar a seleção de equipamentos de forma manual e verificar o cumprimento das normas. Considera-se que apenas o conhecimento prático, e sensibilidade dos projetistas e das exigências particulares da própria instalação, permitirá selecionar os equipamentos adequados às instalações. Esta ferramenta permite que os cálculos se realizem de forma automática, e seja produzido um documento justificativo dos próprios cálculos.

Também é objetivo do presente trabalho efetuar uma abordagem global à execução de projetos de Instalações Elétricas, resultando no levantamento e análise da regulamentação e normalização mais relevante.

O capítulo 5 tem o objetivo de estudar e aprofundar alguns parâmetros relacionados com o projeto e dimensionamento de Instalações Elétricas, que normalmente não são do domínio comum dos projetistas de Instalações Elétricas, nomeadamente a abordagem em relação à temática relacionada com as perturbações harmónicas nas Instalações Elétricas.

9.2 DIREÇÕES DE TRABALHO FUTURO

No desenvolvimento do presente trabalho poderia ser feita uma ferramenta computacional, baseada numa linguagem de programação orientada por objetos, que permitisse a elaboração de um diagrama de forma a tornar mais intuitiva a introdução dos dados.

Também poderia ser desenvolvida uma ferramenta que permitisse a elaboração automática de bases de memórias descritivas de acordo com a tipologia das Instalações Elétricas.

10. BIBLIOGRAFIA

- [1] Direção Geral de Geologia e Energia, “RTIEBT - Regras Técnicas das Instalações Eléctricas de Baixa Tensão, 1ª Edição Anotada”, Portugal, 2006.
- [2] Decreto-Lei n.º 740/74, Diário do Governo, I Série, Número 299, Quinta-feira 26 de dezembro de 1974, Portugal.
- [3] Decreto-Lei n.º 226/2005, DIÁRIO DA REPÚBLICA, I SÉRIE-A, N.º 248 — 28 de dezembro de 2005, Portugal.
- [4] Compilação da Legislação Aplicável à Certificação de Instalações Eléctricas, CERTIEL, 2007.
- [5] Portaria n.º 949-A/2006, Diário da República, 1.ª série — N.º 175 — 11 de setembro de 2006, Portugal.
- [6] Decreto-Lei n.º 220/2008, Ministério da Administração Interna, Diário da República, 1.ª série — N.º 220 — 12 de novembro de 2008, Portugal.
- [7] Portaria n.º 1532/2008, Ministério da Administração Interna, Diário da República, 1.ª série — N.º 250 — 29 de dezembro de 2008, Portugal.
- [8] Lei n.º 60/2007, Diário da República, 1.ª série — N.º 170 — 4 de setembro de 2007, Portugal.
- [9] Decreto-Lei n.º 9/2007, Diário da República, 1.ª série — N.º 12 — 17 de janeiro de 2007, Portugal.
- [10] Portaria n.º 215/2011, Diário da República, 1.ª série — N.º 105 — 31 de maio de 2011, Portugal.
- [11] Portaria n.º 327/2008, Diário da República, 1.ª série — N.º 82 — 28 de abril de 2008, Portugal.
- [12] NP EN 45020, Normalização e actividades correlacionadas – 2009, Portugal.
- [13] ALMACINHA, José António, “Introdução ao Conceito de Normalização em Geral e a sua Importância na Engenharia”, FEUP, Portugal, data de consulta: 18 de abril de 2014.
- [14] <http://www.apq.pt/conteudo.aspx?id=144&idcm=38> data de consulta: 08 de junho de 2013.

- [15] UTE C 15-500, “GUIDE PRATIQUE – Détermination des sections des conducteurs et choix des dispositifs de protection à l’aide de logiciels de calcul”, Union Technique de l’électricité et de la communication, 2006.
- [16] Decreto-Lei n.º 517/80, Ministério da Indústria e da Energia, I Série — N.º 253 — 31-10-1980, Portugal.
- [17] “Guia Técnico”, Solidal Condutores Eléctricos SA, Grupo Quintas & Quintas Condutores Eléctricos SA, Portugal, Maio 2007.
- [18] “Programa de Formação Técnica Continuada – Os Efeitos dos Curtos-Circuitos”, Schneider Electric, disponível em http://www.schneiderelectric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/tema2_efeitos.pdf, data de consulta: 16 de abril de 2014.
- [19] <http://www.prof2000.pt/users/lpa>, data de consulta: 18 de dezembro de 2013.
- [20] Schneider Electric, Electrical design software > My Ecodial L, Versão 3.4.1.8 > Documentação Técnica, 2008.
- [21] <https://woc.uc.pt/deec/getFile.do?tipo=2&id=9991>, data de consulta: 18 de junho de 2012.
- [22] M. A. Matos, "Introdução ao Cálculo de Curto-Circuitos Trifásicos Simétricos pela pela Norma CEI 909", 1996.
- [23] Decreto Regulamentar n.º 90/84, Regulamento de Segurança de Redes de Distribuição de Baixa Tensão, Ministério da Indústria e Energia e Equipamento Social, Administração Interna, Diário da República, 1.ª série — N.º 297 — 26 de dezembro de 1984, Portugal.
- [24] SOARES, Constantino Vital Sopa, “Instalações Eléctricas de Baixa Tensão, Projeto, Execução e Exploração”, CERTIEL, Portugal, 2006.
- [25] SARAIVA, João Paulo Tomé, “Dimensionamento e Protecção de Canalizações Eléctricas em Baixa Tensão”, Instalações Eléctricas 3º Ano da Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e Computadores, Departamento de Engenharia Electrotécnica e Computadores da FEUP, setembro de 2000.
- [26] GOMES, António Augusto Araújo, “Instalações Eléctricas de Baixa Tensão – Canalizações Eléctricas”, Publíndustria, 2012.
- [27] ISONI, Marcos, “A Moderna Eficientização Energética e seus Efeitos sobre o Desempenho Operacional de Equipamentos de Instalações Eléctricas”, disponível em http://www.engeparc.com.br/cariboost_files/4-Harmonicas.pdf, data de consulta: 16 de agosto de 2014.

- [28] <http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf>, data de consulta: 16 de agosto de 2014.
- [29] Moreno, Hilton, “Harmónicas nas Instalações Eléctricas”, Procobre, São Paulo, 2001.
- [30] DIAS, Guilherme Alfredo Dentzien, “Harmónicas em Sistemas Industriais”, 2ª Edição, EDIPUCRS, 2002.
- [31] http://www.wamco.com.ar/pdf/art_tec1_balasto_electronicos.pdf, data de consulta: 16 de agosto de 2014.
- [32] CHAPMAN, David, “Guia de Aplicação de Qualidade de Energia – Harmónicas Causas e Efeitos”, Copper Development Association, julho 2002.
- [34] “Electrical Instalation Guide 2013”, Schneider Electric S.A.
- [35] Correia, Paulo Jorge de Figueiredo, “O Impacto dos Problemas de Qualidade da Energia em Instalações Eléctricas”, FCTUC, Coimbra, janeiro 2007.
- [36] Decreto-Lei n.º 101/2007, Diário da República, 1.ª série — N.º 65 — 2 de abril de 2007, Portugal.
- [37] Decreto Regulamentar n.º 14/77, Ministério da Indústria e Tecnologia, Secretaria de Estado da Energia e Minas, Direção Geral dos Serviços Eléctricos, I Série — Número 41, Portugal.
- [38] Gonçalves, José G., “Apontamentos de Sistemas de Energia para Telecomunicações”, Cap. VIII – Harmónicas em Circuitos de Rectificação para Cargas Resistivas, ex-Bacharelato em Eletrónica e Telecomunicações, ISECMAR, Cabo Verde, 2006/2007.
- [39] Borgonovo, Davis, “Modelagem e Controle de Retificadores PWM Trifásicos Empregando a Transformação de Park”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2001.