

# Analizador de qualidade de energia eléctrica embebido na instalação eléctrica

Sara Catarina Pinto Freitas

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em  
Energias Sustentáveis

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



3 de dezembro de 2013



Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projecto/Estágio do 2º ano do Mestrado  
em Energias Sustentáveis

Candidato: Sara Catarina Pinto Freitas, N° 1070310, 1070310@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Doutor Manuel Carlos Malheiro de Carvalho Felgueiras,  
mcf@isep.ipp.pt

Empresa: EVOLEO Technologies.

Supervisão: Rodolfo Manuel Maia da Cruz Martins, rodolfo.martins@evoleotech.com

António João dos Santos Sousa, antonio.sousa@evoleotech.com

Mestrado em Engenharia Energias Sustentáveis  
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



3 de dezembro de 2013



*Ao Jorge Pinto, o meu melhor amigo.*



## *Agradecimentos*

Várias foram as instituições e pessoas que directa ou indirectamente contribuíram na realização deste trabalho, pelo que gostaria aqui lhes manifestar os meus públicos agradecimentos.

Agradeço à empresa *Evoleo Technologies*, nas pessoas do Eng<sup>o</sup> Rodolfo Martins e Eng<sup>o</sup> António Sousa, pela oportunidade de realizar este estágio tão interessante e multidisciplinar que me permitiram alargar o meu leque de conhecimentos. Agradeço a toda a equipa desta empresa o apoio em todas as decisões no desenvolvimento deste projecto.

Ao meu orientador do Instituto Superior de Engenharia do Porto, Prof. Doutor Carlos Felgueiras, agradeço pela sua disponibilidade e especialmente os conselhos e o apoio que muito contribuíram para o sucesso deste trabalho.

O meu especial agradecimento a todos os meus amigos de curso do ano de 2007, que fizeram com que a minha vida académica fosse vivida com amizade e entreajuda, especialmente ao Carlos Brás, Artur Junqueira, Fernando Ribeiro, André Neves, Daniel Baptista e José Santos.

Por último agradeço ao Vitor, aos meus amigos de infância Sandra, Leandro, Miguel e Ricardo, e à minha família, pelas palavras de conforto e de incentivo. Nunca esquecerei os sacrifícios que fizeram para que fosse possível o desfecho desta importante etapa na minha vida.



## *Resumo*

A monitorização da qualidade da energia eléctrica tem revelado importância crescente na gestão e caracterização da rede eléctrica. Estudos revelam que os custos directos relacionados com perda de qualidade da energia eléctrica podem representar cerca de 1,5 % do PIB nacional. Para além destes, tem-se adicionalmente os custos indirectos o que se traduz num problema que necessita de minimização. No contexto da minimização dos danos causados pela degradação de energia, são utilizados equipamentos com capacidade de caracterizar a energia eléctrica através da sua monitorização. A utilização destes equipamentos têm subjacente normas de qualidade de energia, que impõem requisitos mínimos de modo a enquadrar e classificar eventos ocorridos na rede eléctrica. Deste modo obtêm-se dados coerentes provenientes de diferentes equipamentos. A monitorização dos parâmetros associados à energia eléctrica é frequentemente realizada através da instalação temporária dos equipamentos na rede eléctrica, o que resulta numa observação de distúrbios *a posteriori* da sua ocasião. Esta metodologia não permite detectar o evento eléctrico original mas, quando muito, outros que se espera que sejam semelhantes ao ocorrido. Repare-se, no entanto, que existe um conjunto alargado de eventos que não são repetitivos, constituindo assim uma limitação aquela metodologia.

Este trabalho descreve uma alternativa à metodologia de utilização tradicional dos equipamentos. A solução consiste em realizar um analisador de energia que faça parte integrante da instalação e permita a monitorização contínua da rede eléctrica. Este equipamento deve ter um custo suficientemente baixo para que seja justificável nesta utilização alternativa.

O analisador de qualidade de energia a desenvolver tem por base o circuito integrado ADE7880, que permite obter um conjunto de parâmetros da qualidade de energia eléctrica de acordo com as normas de energia IEC 61000-4-30 e IEC 61000-4-7. Este analisador permite a recolha contínua de dados específicos da rede eléctrica, e que posteriormente serão armazenados e colocados à disposição do utilizador. Deste modo os dados recolhidos serão apresentados ao utilizador para consulta, de maneira a verificar, de modo contínuo a eventual ocorrência das anomalias na rede. Os valores adquiridos podem ainda ser

reutilizados vantajosamente para muitas outras finalidades tais como efectuar estudos sobre a optimização energética.

O trabalho presentemente desenvolvido decorre de uma utilização alternativa do dispositivo WeSense Energy1 desenvolvido pela equipa da Evoleo Technologies. A presente vertente permite obter parâmetros determinados pelo ADE7880 tais como por exemplo harmónicos, eventos transitórios de tensão e corrente e o desfasamento entre fases, realizando assim uma nova versão do dispositivo, o WeSense Energy2.

Adicionalmente este trabalho inclui a visualização remota dos através de uma página *web*.

### ***Palavras-Chave***

Qualidade de Energia, Qualidade de tensão, Perturbações da qualidade de energia, Monitorização, ADE7880, EN 50160, IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-30, WeSense Energy2.

## *Abstract*

The monitoring of power quality has shown an increasing importance in the management and characterization of the electrical network. Studies reveal that the direct costs related to loss of power quality can represent approximately 1, 5 % of the national PIB. In addition to these, there are additional indirect costs which results in a problem that requires minimization. In the context of minimizing the damage caused by the degradation of energy, equipments are used for capable of electrical energy characterization though it's constant motorization. The use of these devices has the underlying power quality standards, which impose minimum requirements in order to regulate and classify events in the power grids. This way, consistent data from different devices are obtained. The monitoring parameters associated with electricity are often accomplished through the temporary installation of equipments in the power grid, which results in the subsequent observation of disorders of its occasion. This methodology does not allow detecting the original power event but, at most, others are expected to be similar to that which occurred. It should be noted, however, that there is a wide range of events that are not repetitive, therefore constituting a limitation that the methodology.

This paper describes an alternative methodology to the traditional usage of this equipments. The solution is to carry out an energy analyzer to be an integral part of the installation and allow a continuous monitoring of the power grid. This equipment must have a sufficiently low cost to be justified in this alternative use.

The power quality analyzer to develop is based on the integrated circuit ADE7880, which allows to obtain a set of power quality parameters according to the energy standards IEC 61000-4-30 and IEC 61000-4-7. This analyzer allows continuous data collection specific to the power grid, which later will be stored and made available to the user. In this manner, the data collected will be presented to the user for query, in order to check continuously the possible occurrence anomalies in the power grid. The acquired values may also advantageously be reused for many other purposes such as carrying out studies on energy optimization.

The present developed work stems from an alternative use of the device WeSense Energy1 developed by team Evoleo Technologies. This aspect allows to obtain certain parameters determined by ADE7880 such as overvoltages, harmonics, transient overvoltages of

voltage and current and the gap between phases, thus creating a new version of the device the WeSense Energy2.

Additionally this work includes remote viewing through a web page.

***Keywords***

ADE7880, EN50160, IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-30, Power Quality, Voltage Quality, Power quality Disorders, WeSense Energy2, Monitoring.

## *Nota ao leitor*

A maior parte da literatura referente à área onde se insere este trabalho está publicada em inglês. A linguagem oral corrente adopta na generalidade a maioria dos termos consagrados na língua inglesa. Deste modo, a escrita em português dum documento desta natureza vê-se restrita pela necessidade de escolher entre os termos comumente usados ou a respectiva tradução, de forma a não afectar a compreensão e a clareza da exposição. Decido assim adoptar o uso de termos em português, sempre que não suscitarem dúvidas e dos termos consagrados em inglês nos restantes casos.

O estilo itálico é utilizado nos termos em inglês e para dar ênfase a determinadas palavras no enquadramento do trabalho.

Os acrónimos são apresentados em maiúsculas, apresentando-se uma lista de todos os acrónimos no início deste documento de modo a identificar o seu significado.



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>VII</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XI</b>
<b>NOTA AO LEITOR</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XXI</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>GLOSSÁRIO</b> .....	<b>XXIX</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. A EMPRESA EVOLEO TECHNOLOGIES .....	1
1.2. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	6
<b>2. ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>9</b>
<b>3. CONCEITOS ASSOCIADOS À QUALIDADE DE ENERGIA ELÉCTRICA</b> .....	<b>29</b>
3.1. CONCEITOS ASSOCIADOS À QUALIDADE DE ENERGIA .....	30
3.2. NORMAS ASSOCIADAS À QUALIDADE DE ENERGIA ELÉCTRICA .....	60
3.3. PROPOSTA DE MODELO DE MONITORIZAÇÃO .....	77
<b>4. PROPOSTA DA SOLUÇÃO</b> .....	<b>79</b>
4.1. WESENSE ENERGY1 .....	80
4.2. DEFINIÇÃO DO PROJECTO .....	85
4.3. WESENSE ENERGY2 .....	86
4.4. LISTA DE REQUISITOS .....	88
4.5. ESTUDO E OPÇÕES DO PROJECTO .....	90
<b>5. IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO</b> .....	<b>93</b>
5.1. ARQUITECTURA DO SISTEMA .....	94
5.2. AQUISIÇÃO DE DADOS .....	96
5.3. PLATAFORMA <i>WEB</i> .....	102
5.4. RESUMO DO CAPÍTULO DA DESCRIÇÃO DE SOLUÇÃO .....	105
<b>6. VALIDAÇÃO</b> .....	<b>107</b>
6.1. VALIDAÇÃO DO PROJECTO .....	107
6.2. CUMPRIMENTO DAS NORMAS .....	108
6.3. LISTA DE REQUISITOS VALIDADA .....	113
<b>7. CONCLUSÕES</b> .....	<b>117</b>
<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS</b> .....	<b>121</b>



## Índice de Figuras

Figura 1 – Logótipo da empresa Evoleo Technologies (Evoleo Technologies, 2012).....	2
Figura 2 – Percentagem dos incidentes na rede eléctrica, em 8000 empresas, ano de 2011 (Freitas, 2011). .....	4
Figura 3 – Quantificação de prejuízos por tipo de incidente, ano 2011 (Freitas, 2011).....	4
Figura 4 – Aspecto físico do analisador de <i>QWave Premium</i> . .....	12
Figura 5 – Aspecto físico do analisador <i>QWave Light- Power Quality RTU</i> . .....	13
Figura 6 – Analisador da QEE da gama Qualistar (Qualistar, 2008). .....	14
Figura 7 – Analisador de QEE, MAR 202 (MEGABRAS). .....	15
Figura 8 – Características físicas do equipamento IMC Polares (IMC, 2012). .....	16
Figura 9 – Aspecto frontal do analisador de QEE da Janitza Electronics (FFONSECA, 2010). .....	16
Figura 10 – Aspecto físico do analisador de QEE, ELSPÉC G4000 BLACKBOX (KRON, 2013). .....	18
Figura 11 – Circuito integrado CS546X da <i>Cirrus Logic</i> (Logic, 2013) .....	18
Figura 12 – <i>Pin-out</i> do circuito integrado ADE7880 (Analog Devices, 2012). .....	21
Figura 13 – Diagrama de blocos de um sistema de aquisição e processamento de dados. ....	22
Figura 14 – Camadas constituintes do modelo TCP/IP.....	23
Figura 15 – Troca de dados entre os módulos de controlo e aquisição de dados e os computadores remotos. ....	24
Figura 16 – Troca de mensagens entre o <i>cliente-side</i> e o <i>server-side</i> . .....	25
Figura 17 – Exemplo de um excerto de código CSS (w3school, 2013). .....	26
Figura 18 – Excerto de ficheiro .html (HTML4BLOG, 2011). .....	26
Figura 19 – Excerto de código Javascript implementado num ficheiro html (w3school, 2013). .....	27
Figura 20 - Sistema trifásico equilibrado. ....	31
Figura 21 – Fonte de alimentação comutada. ....	32
Figura 22 – Forma de onda da tensão e corrente de um sistema com carga não linear (EDP, 2005). .....	32
Figura 23 - Forma de onda da tensão e corrente de um sistema com carga linear (EDP, 2005). .....	33
Figura 24 – Zonas de degradação da QEE no sistema eléctrico de energia (EDP, 2005). .....	34
Figura 25 – Linhas de transporte de energia eléctrica.....	35
Figura 26 – Rede subterrânea de distribuição de energia eléctrica. ....	36
Figura 27 – Interrupção de tensão (EDP, 2005). .....	38
Figura 28 – Efeito de uma cava de tensão numa onda de tensão (EDP Distribuição, 2007). ....	40
Figura 29 – Origem de uma cava de tensão num sistema T&D (EDP Distribuição, 2007). .....	41
Figura 30 – Esquema eléctrico de um VEV. ....	43
Figura 31 – Esquema eléctrico de um contactor utilizado no comando de um motor. ....	43

Figura 32 – Sobretensão transitória (Martins, et al., 2003). .....	45
Figura 33 – Sobretensão resultante da elevação do potencial de terra (Caçote, 2012). .....	46
Figura 34 – Utilização de cabos de guardas numa rede T&D. ....	47
Figura 35 – Símbolo eléctrico de uma <i>Voltage Dependent Resistor</i> . ....	48
Figura 36 – Flutuação de tensão (EDP, 2005). ....	49
Figura 37 – Variação da tensão provocada por <i>flicker</i> do tipo A .....	49
Figura 38 – Variação da tensão provocada por <i>flicker</i> do tipo B. ....	50
Figura 39 – Variação da tensão provocada por <i>flicker</i> do tipo C. ....	50
Figura 40 – Variação da tensão provocada por <i>flicker</i> do tipo D. ....	51
Figura 41 – Sistema eléctrico equilibrado e sistema eléctrico desequilibrado entre tensões (EDP Distribuição, 2007). ....	52
Figura 42 – Decomposição de um sistema trifásico desequilibrado, em tensões simétricas. ....	53
Figura 43 – Esquema de conexão de um transformador <i>Scott</i> . ....	56
Figura 44 – Transformador de <i>Steinmetz</i> a alimentar um sistema de tracção monofásico(EDP, 2005). ....	56
Figura 45 – Distorção harmónica numa onda de tensão(EDP, 2005). ....	57
Figura 46 – Distorção harmónica da tensão provocada por correntes harmónicas (Oliveira, 2012).58	
Figura 47 – Parâmetros utilizados na concretização de uma normalização. ....	61
Figura 48 – Entidades reguladoras internacionais e portuguesas associadas à normalização da QEE. ....	62
Figura 49 – Comités electrotécnicos nacionais, membros do CENELEC (CENELEC). ....	65
Figura 50 – Denominação de uma norma EN. ....	66
Figura 51 – Organização do SEN (Caçote, 2012). ....	68
Figura 52 – Normalização da QEE, internacionais e portuguesas. ....	71
Figura 53 – Modelo de monitorização.....	77
Figura 54 – Diagrama de blocos da proposta de solução apresentada para a concretização do WeSense Energy2.....	80
Figura 55 – Diagrama de blocos geral do WeSense Energy1. ....	82
Figura 56 – <i>Pin-out</i> da PIC18F47J53.....	82
Figura 57 – <i>Pin-out</i> do módulo de comunicação ENC6424J600 (Microchip Technology Inc., 2009). ....	83
Figura 58 – Diagrama da <i>evaluating board</i> do ADE7880 (Analog Devices, 2012). ....	84
Figura 59 – Painel inicial do <i>software</i> de apoio à monitorização de energia (Analog Devices, 2012). ....	85
Figura 60 – Diagrama de blocos do funcionamento do sistema WeSense Energy2. ....	87
Figura 61 – Arquitectura do sistema WeSense Energy2. ....	94
Figura 62 – Diagrama de blocos do núcleo de processamento.....	95
Figura 63 – Fluxograma geral do sistema. ....	96
Figura 64 - Composição dos registos IPEAK e VPEAK do ADE7880 .....	99

Figura 65 – Monitorização de harmónicos (Analog Devices, 2012).....	101
Figura 66 – Excerto de código do ficheiro XML. ....	101
Figura 67 – Mapa da plataforma <i>web</i> do AQEE. ....	102
Figura 68 - Interface gráfica da página <i>System Configuration</i> .....	103
Figura 69 – Interface gráfica da página <i>Board Configuration</i> . ....	104
Figura 70 – Excerto de código da página <i>Overview</i> .....	104
Figura 71 – Interface gráfica da página principal do AQEE. ....	105
Figura 72 – Normalização associada à monitorização da qualidade de energia eléctrica. ....	109



## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Incidentes ocorridos em 8000 indústrias portuguesas, ano 2011 (Freitas, 2011).....	3
Tabela 2 – Analisadores de QEE, gama ALPTEC 2400 (AlpesTechnologies, 2012).....	11
Tabela 3 – Características do dispositivo <i>QWave Premium</i> (LEM, 2005).....	12
Tabela 4 – Características do analisador <i>QWave Light- Power Quality RTU</i> (LEM, 2005).....	13
Tabela 5 – Características dos analisadores de QEE da gama Qualistar (Qualistar, 2008). ....	14
Tabela 6 – Características do circuito integrado MAXQ3180 (MaximIntegrated, 2013).....	19
Tabela 7 – Classificação dos harmónicos (EDP, 2005). ....	57
Tabela 8 – Classificação das zonas de implementação dos padrões de qualidade de serviço, de acordo com o RQS (ERSE, 2009).....	73
Tabela 9 – Especificações técnicas do equipamento <i>WeSense Energy</i> . ....	81
Tabela 10 – Requisitos do sistema. ....	88
Tabela 11 – Configuração dos bits ANGLESEL do registo COMPMODE. ....	97
Tabela 12 – Configuração dos bits PEAKSEL do registo MMODE. ....	98
Tabela 13 – Descrição do resultado obtido nos bits OIPHASE e OVPHASE do registo PHSTATUS.....	100
Tabela 14 – Gama de variação dos parâmetros medidos, Classe A (IEC, 2003). ....	110
Tabela 15 - Gama de variação dos parâmetros medidos, Classe B (IEC, 2003). ....	110
Tabela 16 - Requisitos de precisão para medições de corrente, tensão e potência (IEC). ....	111
Tabela 17 – Limites da componente harmónica da corrente de acordo com as Classe A e B (Pomilio, 2007). ....	112
Tabela 18 – Limites da componente harmónica da corrente de acordo com as Classe C (Pomilio, 2007). ....	112
Tabela 19 – Limites da componente harmónica da corrente de acordo com as Classe D (Pomilio, 2007). ....	113
Tabela 20 – Tabela de requisitos validados.....	113



## *Nomenclatura*

$f$	–	Frequência
FP	–	Factor de Potência
$HI_{RMS}$	–	Componente harmónica da corrente eficaz
$HV_{RMS}$	–	Componente harmónica da tensão eficaz
$I$	–	Corrente
$I_m$	–	Corrente medida
$I_{nom}$	–	Corrente nominal
$I_{RMS}$	–	Corrente eficaz
$P$	–	Potência Activa
$Q$	–	Potência aparente
$S$	–	Potência reactiva
$U$	–	Tensão
$U_c$	–	Tensão Declarada
$U_m$	–	Tensão medida
$U_{nom}$	–	Tensão nominal
$V_{RMS}$	–	Tensão eficaz



## *Acrónimos*

$\mu$ C	–	Microcontrolador
AC	–	<i>Alternating Current</i>
ADC	–	<i>Analog-to-digital Converter</i>
ANSI	–	<i>American National Standards Institute</i>
AQEE	–	Analisador de Qualidade de Energia Eléctrica
ARTM	–	<i>Adaptive Real Time Monitoring</i>
BT	–	Baixa Tensão
CE	–	Comissão Europeia
CEE	–	Comunidade Económica Europeia
CENELCOM	–	<i>Committee European for the Cordination of Electrotechnical Standards in the European Economic Community</i>
CENELEC	–	Comité Europeu de Electrotécnia
CI	–	Circuito Integrado
CISPR	–	<i>Internation Special Committee on radio Interference</i>
CP	–	Caminhos de Portugal
CSS	–	<i>Cascading Style Sheets</i>
DC	–	<i>Direct Current</i>
DFT	–	<i>Discret Fourier Transform</i>
DFT	–	<i>Discret Fourirer Transform</i>
DSP	–	<i>Digital Signal Processing</i>

DVR	– <i>Dynamic Voltage Restorers</i>
EDA	– Energias dos Açores
EDP	– Energias de Portugal
EEM	– Empresa de Electricidade da Madeira
EMC	– <i>Electromagnetic Compability</i>
EN	– <i>European Norms</i>
ERSE	– Entidade Reguladora de Serviços Energéticos
ESA	– <i>European Space Agency</i>
EUA	– Estados Unidos da América
FFT	– <i>Fast Fourier Transform</i>
FFT	– <i>Fast Fourier Transform</i>
GSM	– <i>Global System for Mobile communication</i>
HSDC	– <i>High Speed Data Capture</i>
HTML	– <i>HyperText Markup Language</i>
HTTP	– <i>HyperText Transfer Protocol</i>
I2C	– <i>Inter- Integrated Circuit</i>
IEC	– <i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	– <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEV	– <i>International Electrotechnical Vocabulary</i>
IP	– <i>Internet Protocol</i>
ISEP	– Instituto Superior de Engenharia do Porto

MAC	– <i>Media Access Control</i>
MAT	– Muito Alta Tensão
MT	– Média Tensão
PIB	– Produto Interno Bruto
PME	– Pequena Média Empresa
PXI	– <i>Peripheral component interconnect eXtension for Instrumentations</i>
QEE	– Qualidade de Energia Eléctrica
RQS	– Regulamento de Qualidade de Serviço
RTC	– <i>Real Time Clock</i>
SD	– <i>Secure Digital card</i>
SEE	– Sistema Eléctrico de Energia
SEI	– Sistema Eléctrico Independente
SEN	– Sistema Eléctrico Nacional
SENV	– Sistema Eléctrico Não Vinculado
SEP	– Sistema Eléctrico de serviço Público
SMS	– <i>Short Message Service</i>
SPI	– <i>Serial Peripheral Interface</i>
T&D	– Transporte e Distribuição (de acordo com a EDP)
TCP/IP	– <i>Transmission Control Protocol / Internet Protocol</i>
THD	– <i>Total Harmonic Distortion</i>
UPS	– <i>Uninterruptable Power Suply</i>

USB	– <i>Universal Serial Bus</i>
$V_{AC}$	– <i>Voltage Alternating Current</i>
$V_{DC}$	– <i>Voltage Direct Current</i>
VDR	– <i>Voltage Dependent Resistor</i>
VEV	– Variadores Electrónicos de Velocidade
$V_{RMS}$	– <i>Voltage Root Mean Square</i>
W3C	– <i>World Wide Web Consortium</i>
XML	– <i>eXtensible Markup Language</i>

## *Glossário*

**Baixa tensão** – tensão utilizada para o fornecimento de energia eléctrica cujo valor eficaz nominal tenha o limite máximo de 1kV.

**Cava de tensão** – fenómeno eléctrico caracterizado por uma diminuição brusca da tensão de alimentação para um valor situado entre 90% e 1% da tensão declarada  $U_c$ , seguida do restabelecimento da tensão depois de um curto lapso de tempo, compreendido entre os dez milissegundos e um minuto.

**Circuitos integrados especiais para monitorização da QEE** – circuitos integrados que apresentam funcionalidades ou que foram especialmente projectados para permitir a monitorização dos parâmetros associados à QEE.

**Continuidade de tensão ou continuidade de serviço** – fiabilidade no abastecimento contínuo da tensão, dependendo do número e duração das interrupções de fornecimento de energia eléctrica.

**Degradação** – No contexto deste trabalho, a degradação da qualidade de energia eléctrica envolve a degradação resultante das perturbações a que a qualidade de energia está sujeita.

**Desequilíbrio de tensões** – Estado no qual os valores eficazes das tensões das fases ou das defasagens entre tensões de fases consecutivas, num sistema trifásico, não são iguais.

**Desfasamento entre fases** – ocorre quando duas funções da mesma frequência não apresentam os respectivos máximos simultâneos.

**Distorção harmónica** – forma de caracterizar a deformação de uma forma de onda sinusoidal.

**Entidades reguladoras** - organizações com o objectivo prestar auxílio, a uma determinada actividade de um sector, acompanhando a implementação das regras impostas por si ou por entidades governamentais.

**Equipamentos fixos** – equipamentos de monitorização de energia que podem ser embebidos na instalação eléctrica.

**Equipamentos portáteis** – equipamentos de monitorização de energia que necessitam de ser transportados até a um ponto da rede para efectuarem a monitorização.

**Flutuações de tensão** – fenómeno eléctrico onde ocorrem variações repetitivas e aleatórias na onda de tensão, provocadas pela operação de cargas com características de alterações rápidas e bruscas nas magnitudes da potência reactiva e activa.

**Harmónico** – Tensões ou correntes com frequências múltiplas inteiras da componente fundamental.

**Interrupção** – fenómeno eléctrico em que a tensão de alimentação no ponto de entrega é inferior a 1% da tensão declarada  $U_c$ . Pode ser classificada como interrupção prevista ou acidental.

**Interrupção acidental** – ocorre devido a defeitos permanentes ou transitórios, na sua maioria associados a acontecimentos externos, a avarias ou a interferências. Podem ser classificadas como breves ou longas.

**Interrupção breve** – tem duração inferior ou igual a três minutos e é provocada por um defeito transitório

**Interrupção longa** – tem duração superior a três minutos e é provocada por um defeito permanente.

**Interrupção prevista** – ocorre quando os clientes são informados com antecedência, para permitir a execução de trabalhos programados na rede de distribuição.

**Média tensão** – tensão utilizada para o fornecimento de energia eléctrica cujo valor eficaz nominal seja superior a 1kV e não superior a 35 kV.

**Monitorização em tempo real (*real-time monitoring*)** – operação de observação que consiste em armazenar um conjunto muito alargado de valores de uma ou várias grandezas.

**Normalização** – permite determinar um conjunto de regras com vista a obter o bom funcionamento de um processo, satisfazendo as exigências do consumidor e protegendo os interesses de todas as partes interessadas.

**Operações avançadas de depuração** – resultam da conjugação de operações básicas de depuração por exemplo, monitorização por condição e monitorização em tempo real.

**Operações básicas de depuração** – actividades efectuadas sobre os estados de um circuito, para efeitos de diagnósticos e que inclui a monitorização e verificação.

**Perturbação** – alteração da ordem ou do bom funcionamento. No contexto deste trabalho, entende-se por perturbação a alteração da qualidade de energia eléctrica.

**Qualidade da onda de tensão** – parâmetro que quantifica a proximidade à situação ideal. As formas de onda de tensão devem ser sinusoidais com valor de amplitude e frequência declaradas, e desfasadas de 120° no tempo. Pode referir-se apenas a um dos parâmetros envolvidos.

**Qualidade de energia eléctrica** - conjunto de modificações que podem ocorrer no sistema eléctrico e está associado a todos os problemas de energia manifestados na tensão, corrente ou em variações de frequência resultantes de uma falha ou má operação de equipamentos de consumidores.

**Sobretensão** - fenómeno eléctrico que ocorre quando a rede eléctrica ou qualquer outra fonte de electricidade excede o seu valor nominal.

**Sobretensões externas** – ocorrem devido a acontecimentos externos à rede, como por exemplo descargas atmosféricas, efeitos de campos electromagnéticos e de condições atmosféricas adversas.

**Sobretensões internas** – ocorrem devido a acontecimentos internos à rede, por exemplo manobras de disjuntores, a propagações de correntes harmónicas no sistema e de fenómenos de ressonância.

**Sobretensões permanentes** – sobretensões que apresentam uma duração longa como consequência de grandes manobras e avarias na rede de distribuição devido a quedas de árvores, condições atmosféricas etc.

**Sobretensões transitórias** – sobretensões de curta duração na ordem de microssegundos e pode ser provocada por descargas atmosféricas ou por manobras na rede.

**Tremulação (*Flicker*)** – fenómeno eléctrico que provoca a impressão de instabilidade da sensação visual provocada por um estímulo luminoso cuja luminância ou repartição espectral flutua no tempo.

**Valor de pico** – corresponde ao valor máximo de um sinal, no eixo vertical, da tensão e corrente.

# 1. Introdução

O presente documento satisfaz parte dos requisitos da Dissertação/Projecto/Estágio (DPEST) do segunda ano do Mestrado em Energias Sustentáveis, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) e corresponde ao relatório final realizado no decorrer da sua realização. O trabalho foi feito durante um estágio curricular na empresa Evoleo Technologies, tendo incluído o desenvolvimento de uma plataforma de informação onde se pretende gerir e visualizar os dados, provenientes de um analisador de qualidade de energia.

Neste capítulo pretende-se apresentar a empresa onde foi realizado o estágio, a contextualização do trabalho realizado e os objectivos pretendidos para a sua concretização.

## **1.1. A empresa Evoleo Technologies**

A Evoleo Technologies é uma Pequena e Média Empresa (PME), fundada no ano de 2007, que tem a seu cargo uma equipa multidisciplinar de engenharia.

A Evoleo procura e promove parcerias em concordância com a sua função de fornecer soluções de engenharia electrónica *high-end* e diferenciadas, procurando a melhoria contínua, flexibilidade, qualidade e inovação orientada para o cliente.

De modo a alcançar um crescente desenvolvimento, a empresa Evoleo tendo vindo a investir nas competências relacionadas com o desenho de sistemas electrónicos críticos e complexos, abrangendo quatro áreas de actividade:

- Espaço.
- Energia.
- Transportes.
- Saúde.

Relativamente ao *espaço*, a Evoleo tem vindo a desenvolver projectos e desenho de *hardware*, análises e simulações matemáticas, desenvolvimento de *software*, desenho e implementação de sistemas de teste e teste de *hardware* e *software*, destacando-se o projecto *Alphasat* da *European Space Agency* (ESA).

Os projectos ligados à área de energia envolvem o desenvolvimento de sistemas *Peripheral component interconnect eXtension for Instrumentations* (PXI) para teste digital, o desenvolvimento de produtos, focando a optimização energética residencial.

Na área dos transportes, a Evoleo realizou um sistema monitorização da condição da linha durante o percurso dos comboios Alfa Pendular da Caminhos de Portugal (CP), entre Porto e Lisboa, com geo-localização.

Por último, na saúde focalizou-se no desenvolvimento de sistemas electrónicos, sem fios, de condicionamento de sensores, gestão e alerta de situações de emergência.

A figura 1 mostra o logótipo da empresa Evoleo Technologies.



Figura 1 – Logótipo da empresa Evoleo Technologies (Evoleo Technologies, 2012)

## 1.2. Contextualização

A energia eléctrica apresenta uma elevada importância no desenvolvimento da sociedade actual. Deste modo, tem associada a si um conjunto de assuntos para que visam assegurar a

sua qualidade de maneira a ser vantajoso para todos os agentes envolvidos no sector eléctrico. Actualmente Portugal vive um paradigma de disciplina económica, apostando numa constante procura de eficiência operacional através da adopção de medidas importantes no que diz respeito ao apuramento de custos e de uma gestão eficiente. Estas medidas passam pela utilização de meios de modo a assegurar não só a sua qualidade mas também a sua continuidade.

A *não qualidade de energia* resulta em inúmeros problemas tais como custos eléctricos elevados, perdas de produção, aumento do custo de manutenção, paragens do processo de produção, falhas de equipamentos, entre outros.

Vários estudos evidenciam custos relacionados com perda de qualidade da energia eléctrica. Em particular, na Europa os custos relacionados a degradação da qualidade de energia podem assumir “1,5% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional” (Eurelectric, 2004). Em Portugal, estudos apontam valores elevados tanto na ocorrência de incidentes como em prejuízos, referentes à degradação da qualidade de energia. Na tabela 1 mostra o número e o tipo de incidentes ocorridos em 8000 indústrias portuguesas no ano de 2011.

Tabela 1 – Incidentes ocorridos em 8000 indústrias portuguesas, ano 2011 (Freitas, 2011).

<b>Tipo de incidentes</b>	<b>Número de incidentes</b>
<b>Cavas de Tensão</b>	952
<b>Instalação do Cliente</b>	112
<b>Interrupções</b>	1834
<b>Micro Cortes</b>	430
<b>Perturbações tensão</b>	36

O tipo de incidente classificado como *instalação do cliente* são os incidentes que ocorrem na instalação do cliente, descarta-se assim a hipótese do incidente ocorrer no lado da rede. A figura 2 ilustra, em termos percentuais, o tipo de incidente ocorrido em 8000 instalações industriais, no ano de 2011.

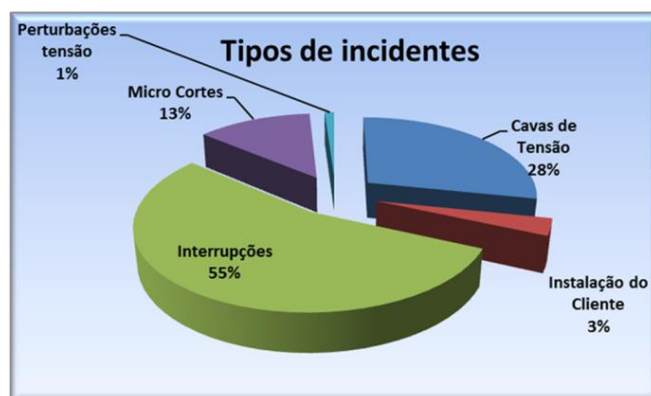


Figura 2 – Percentagem dos incidentes na rede eléctrica, em 8000 empresas, ano de 2011 (Freitas, 2011).

Relativamente aos prejuízos estes são elevados, sendo as *interrupções* as que apresentam maior destaque a esse nível. A figura 3 mostra o gráfico sobre a quantificação dos prejuízos por tipo de incidente.

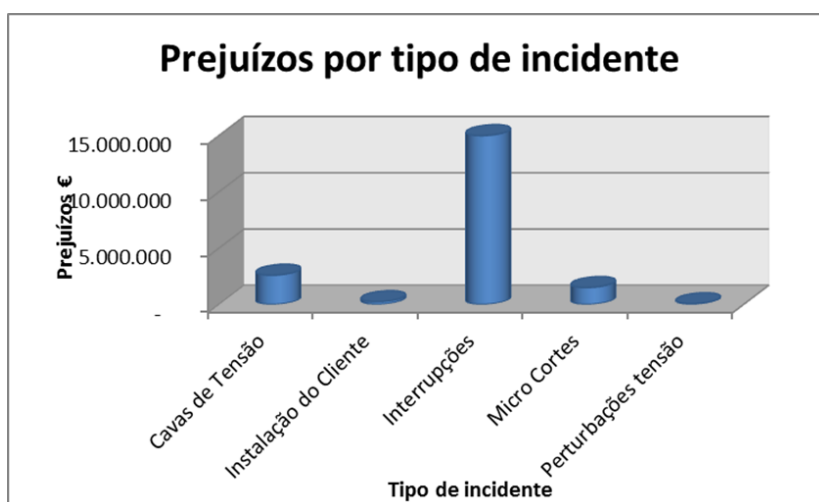


Figura 3 – Quantificação de prejuízos por tipo de incidente, ano 2011 (Freitas, 2011).

Os prejuízos resultantes da ocorrência de anomalias na qualidade de energia eléctrica quer do lado da rede, quer do lado das empresas, representam cinco milhões de euros anuais. Se a este valor adicionarmos outros custos (por exemplo do operador de rede de distribuição), este número subirá consideravelmente.

Além dos números apresentados serem elevados, estima-se que estes subirão rapidamente, se não forem tomadas medidas. Isto deve-se aos efeitos acumulativos que a perda de

qualidade pode impor, seja através da redução da vida útil de dispositivos, limitação da capacidade efectiva dos equipamentos ou mau funcionamento de máquinas.

O negócio de energia eléctrica envolve ainda os fornecedores e os consumidores desse serviço através de regras contratuais que estabelecem as obrigações a cada uma das entidades. São, no entanto, frequentemente as discordâncias relativamente à qualidade do serviço transaccionado. Não raras são as circunstâncias em que o consumidor alega prejuízos decorrentes da excessiva variabilidade de alguns parâmetros do serviço prestado, como sejam sobretensões ou subtensões. A forma tradicional de tentar avaliar estes diferendos passa pela instalação temporária de equipamentos de monitorização da energia eléctrica que permitem detectar se um determinado parâmetro ultrapassa o seu limiar fazendo uso da operação de monitorização por condição (*watch-point*) ou ainda da operação de monitorização em tempo real (*real-time monitoring*) que consiste em armazenar um conjunto alargado de valores de várias grandezas. Em qualquer dos casos esta forma tradicional da utilização dos meios de monitorização da qualidade da rede apresenta o inconveniente de apenas ser utilizada depois da presunção de anomalias na qualidade da energia, sendo uma monitorização *a posteriori*, não se detectado o distúrbio original mas sim outros que se espera virem a ser réplicas relativamente semelhantes da anomalia original. Uma alternativa para ultrapassar a limitação apontada consiste em manter sempre ligado o analisador da qualidade da energia à instalação, embora seja raramente usada dado que os equipamentos apresentam habitualmente boas potencialidades mas um preço muito elevado.

Uma alternativa mais assertiva consistiria na utilização de equipamentos mais simples, com menos potencialidades e precisão mas com custo suficientemente reduzido para o tornar atractivo para uma utilização constante, de modo a que fizesse parte integrante da instalação alvo. Com efeito grande parte dos diferendos entre distribuidor e consumidor de energia tem por base o não-cumprimento grosseiro dos deveres contratualizados, pelo que a verificação dos parâmetros não necessita de equipamentos com elevados requisitos de precisão.

O presente trabalho consiste no desenvolvimento parcial de um analisador de energia eléctrica com potencialidades inferiores ao de um analisador de energia convencional mas de baixo custo para justificar a sua inclusão na instalação alvo. Apesar de se tratar de um equipamento de complexidade reduzida face a um analisador de energia convencional,

inclui componentes electrónicos que reflectem os mais recentes avanços na área da análise da energia eléctrica. Deste modo obtém-se um equipamento de baixo custo, mas mesmo assim, com elevadas potencialidades (exemplo *Fast Fourier Transform* e a *Discret Fourier Transform*) que permite, por exemplo a detecção de harmónicos até à ordem 63, sobretensões e sobrecorrentes, picos de tensão e corrente, detecção do desfasamento entre as fases, entre outros.

Repare-se que este trabalho apresenta uma vertente multidisciplinar, envolvendo conceitos sobre os temas de energia eléctrica, electrónica e normalização de energia eléctrica.

### **1.3. Organização do relatório**

Este relatório encontra-se dividido em sete capítulos.

No *primeiro capítulo*, é feita uma breve introdução, onde se apresenta a contextualização do trabalho efectuado e onde são apresentados os objectivos e as contribuições mais importantes para este projecto.

O *capítulo número dois* expõe o estado da arte associado aos conceitos que vão servir de suporte para a concretização deste projecto, incluindo um estudo do mercado onde são exibidas as características dos equipamentos que possibilitam a análise da qualidade de energia eléctrica.

No *capítulo três*, é realizada uma análise relativa aos conceitos fundamentais inerentes ao conceito qualidade de energia, nomeadamente as perturbações que degradam a qualidade de energia e os locais e origem dessas perturbações. São também apresentadas as normas de qualidade de energia, expondo as entidades reguladoras e governamentais associadas à sua realização e implementação.

O *quarto capítulo* descreve a proposta de solução, apresentando todo o funcionamento do sistema implementado, os requisitos definidos para a concretização do projecto e o modelo proposto para a monitorização a realizar.

O *quinto capítulo* demonstra a solução desenvolvida, apresentando todas as funcionalidades e progresso efectuado ao longo do desenvolvimento do projecto.

O *capítulo seis* apresenta a validação do trabalho realizado, através de testes realizados durante o desenvolvimento e após a sua conclusão.

Por fim, o *sétimo capítulo* descreve todas as conclusões tiradas ao longo do projecto e perspectivas de trabalho futuro para optimização do mesmo.



## 2. Estado da arte

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos subjacentes à concretização do trabalho e que se revelam importantes durante a sua realização.

A elaboração do trabalho engloba várias vertentes, pois aborda não só o conceito qualidade de energia e a sua normalização, mas também uma alternativa de implementação através de um analisador de qualidade de energia (desde o processamento de dados até à interface com o utilizador). Neste capítulo é assim apresentada uma visão do mercado dos analisadores e componentes existentes e os conceitos intrínsecos ao desenvolvimento e implementação do trabalho desenvolvido.

### **2.1. Equipamentos e componentes**

Os sistemas eléctricos e electrónicos influenciam a qualidade da energia de muitas maneiras. Torna-se, portanto, necessário monitorizar a Qualidade de Energia Eléctrica (QEE) de modo a serem tomadas medidas de prevenção e mitigação dos factores que levam à sua degradação.

Assim, para uma análise da QEE são utilizados equipamentos que permitem a observação dos problemas que possam existir ou surgir na rede eléctrica. Estes equipamentos são

utilizados para optimização de perfis de consumo, manutenção preventiva, bem como para recolha de dados para dimensionamento de soluções de mitigação de problemas de QEE, permitindo a análise posterior desses dados.

Embora existam vários modelos de dispositivos de monitorização de QEE disponíveis no mercado, os mais completos apresentam custos demasiado elevados e interfaces com o utilizador pouco intuitivas. Existem vários fabricantes que têm desenvolvido e colocado no mercado vários equipamentos. No contexto deste trabalho vão ser distinguidos três tipos de equipamentos, sendo estes:

- Equipamentos portáteis.
- Equipamentos fixos.
- Circuitos Integrados (CI) especiais para monitorização da QEE.

No âmbito deste documento entende-se por *equipamentos portáteis*, aqueles que necessitam de ser transportados até a um ponto na rede para efectuarem a monitorização de energia. Os *equipamentos fixos* são aqueles que podem ser embebidos na instalação eléctrica. Os *CI especiais para monitorização da QEE* são aqueles apresentam funcionalidades ou que foram especialmente projectados para permitir a monitorização dos parâmetros associados à QEE.





De seguida apresentam-se alguns dos equipamentos portáteis existentes no mercado.

### ***Gama ALPTEC 2400***

A gama ALPTEC 2400 oferece analisadores de QEE com elevada precisão, desenvolvidos com base nas normas NP 50160 e IEC 61000-4-30. Estes analisadores são equipamentos portáteis que possuem conectores rápidos para utilização de pinças de tensão e corrente e apresentam ainda um *software* associado que permite a sua monitorização automática.

A tabela 2 apresenta as características deste equipamento e contém informação acerca dos parâmetros analisados e registados, os módulos de comunicação, a capacidade de memória e outras observações importantes para a sua utilização.

Tabela 2 – Analisadores de QEE, gama ALPTEC 2400 (AlpesTechnologies, 2012).

Referência	Entradas analógicas	Fonte Alimentação	Parâmetros analisados e registrados em memória	Módulos de comunicação	Memória	Observações
AT2444i	 -4 entradas para tensão. -4 entradas para corrente.	- 190-264 V <sub>AC</sub> . - Autonomia de bateria: 45 minutos.	- Cvas, sobretensões e distorções de tensão e corrente. - <i>Flickers</i> . - Harmônicos e inter-harmônicos de tensão e corrente (até à ordem 51). - Desequilíbrios de tensão. - Valores de U, I, P, Q, S, FP, THD.	-USB. - RS232. -Ethernet. -Modem RTC -GSM e modem IP.	-512 Mb. -1 Gb.	-Monitorização de acordo com as normas IEC 61000-4-7 e NP 50160.
AT2333	 -4 entradas para tensão. -4 entradas para corrente.	- 190-264 V <sub>AC</sub> . - 215-600 V <sub>AC</sub> (auto alimentado através das pinças de tensão). - Autonomia de bateria: 45 minutos.	- Cvas, sobretensões e distorções. - <i>Flickers</i> . - Harmônicos e Inter-harmônicos de tensão e corrente (até à ordem 51). - Desequilíbrios de tensão e corrente; - Valores de U, I, P, Q, S, FP, THD.	- USB.	- 1Gb.	-Monitorização de acordo com as normas IEC61000-4-7 e NP50160.
AT2444d	 -4 entradas para tensão. -4 entradas para corrente.	- 190-264 V <sub>AC</sub> ;	-Cvas, sobretensões e distorções. - <i>Flickers</i> . -Harmônicos e inter-harmônicos em tensão e corrente (até à ordem 51). -Desequilíbrios de tensão. - Valores de U, I, P, Q, S,FP, THD.	-USB. - RS232. -Ethernet. -Modem RTC -GSM e modem IP.	-512 Mb. -1 Gb.	-Monitorização de acordo com as normas IEC61000-4-7 e NP50160. -Possui um encapsulamento para instalação em calha.
AT2444duo	 -8 entradas para tensão. -8 entradas para corrente.	-190-264 V <sub>AC</sub> .	-Cvas, sobretensões e distorções; -Relatório de qualidade; - <i>Flickers</i> ; -Harmônicos e inter-harmônicos em tensão e corrente (até à ordem 51). -Desequilíbrio de tensões. -Valores de U, I, P, Q, S, FP, THD.	-USB. - RS232. -Ethernet. -Modem RTC. -GSM e modem IP.	-512 Mb; -1 Gb;	-Monitorização de acordo com as normas IEC 61000-4-7 e NP 50160. -Possui um encapsulamento tipo rack para instalação em bastidores e armários. -Monitoriza e avalia em simultâneo de dois pontos de rede.

## *QWave Power*

A QWave Power fornece analisadores da QEE que permitem a monitorização da energia, a análise dos seus distúrbios, análise preventiva e posterior utilização desses dados. Desta gama, distinguem-se:

- QWave Premium – Power Quality.
- QWave Light- Power Quality RTU.

O *QWave Premium* é um analisador da QEE, que oferece as funções necessárias para realizar a análise da rede de energia, garantindo a avaliação e detecção da fonte de perturbação. A figura 4 mostra o aspecto físico do analisador QWave Premium.



Figura 4 – Aspecto físico do analisador de *QWave Premium*.

A tabela 3 apresenta as características do analisador de energia *QWave Premium*, tais como as saídas e entradas digitais, os parâmetros analisados e registados em memória, os módulos de comunicação e outras observações necessárias para o seu funcionamento (LEM, 2005).

Tabela 3 – Características do dispositivo *QWave Premium* (LEM, 2005).

Saídas digitais	Entradas digitais	Fonte de alimentação	Parâmetros analisados e registados em memória	Módulos de comunicação	Taxa de amostragem	Observações
- 8 saídas digitais isoladas;	- 36 entradas digitais que podem ser utilizadas para alterações do estado de armazenamento.	-85 V - 264 V <sub>AC</sub> ; -100 V - 375 V <sub>DC</sub> ;	-Harmónicos e Inter-harmónicos. - <i>Flickers</i> . -Variações de tensão. -f, I, FP, S, Q. - Desequilíbrios de tensão.	- <i>Ethernet</i> . - <i>Serial Interface</i> . - <i>Modem</i> externo.	- de 100 kHz a 10MHz por canal.	-A monitorização da energia é realizada de acordo com a norma NP 50160. -Classe A da norma IEC 61326-1. - Monitorização em tempo real.

O dispositivo *QWave Light – Power Quality RTU* difere fisicamente do anterior, apresentando menor peso e dimensão. A figura 5 mostra o aspecto físico do analisador de QEE *QWave Light- Power Quality RTU*.



Figura 5 – Aspecto físico do analisador *QWave Light- Power Quality RTU*.

Na tabela 4 estão indicadas as características do analisador *QWave Light- Power Quality RTU*.

Tabela 4 – Características do analisador *QWave Light- Power Quality RTU* (LEM, 2005)

Entradas digitais	Fonte de alimentação	Parâmetros analisados e registados em memória	Módulos de comunicação	Memória	Observações
-3 entradas para tensão. -1 entrada digita. -1 saída digital (relé). - 1 entrada analógica.	-85-265 V <sub>AC</sub> . -110-300 V <sub>DC</sub> .	- V <sub>RMS</sub> . - Inter-harmónicos e harmónicos (até à ordem 50). - <i>Flickers</i> . -Desequilíbrios de tensão. -Frequência. -Picos de tensão e corrente, sobretensões e sobrecorrentes. -THD.	-RS232 e <i>Modem</i> -Protocolos MODBUS RTU e ASCII. - RS485 (em vez do <i>Modem</i> ).	-Memória interna de 4 Mb. -Permite armazenar dados durante 2 meses.	-A monitorização da energia é realizada de acordo com a norma NP 50160. - Os parâmetros analisados são armazenados em simultâneo em intervalos de 10min. - Amostragem sincronizada.

## QUALISTAR

Os analisadores de energia eléctrica da *Qualistar* foram concebidos de modo a serem utilizados no controlo e manutenção de edifícios industriais ou administrativos, permitindo assim, obter informação completa das principais características da qualidade de uma onda de tensão numa instalação eléctrica, bem como monitoriza-las. A figura 6 mostra o aspecto físico do analisador de QEE da gama Qualistar.



Figura 6 – Analisador da QEE da gama Qualistar (Qualistar, 2008).

Existem três tipos de analisadores da QEE da gama Qualistar, diferindo entre si na capacidade de memória, na tensão de entrada e na interface utilizada. Na tabela 5 é realizada uma análise comparativa entre os dispositivos.

Tabela 5 – Características dos analisadores de QEE da gama Qualistar (Qualistar, 2008).

Referência	Entradas digitais	Parâmetros de medição	Capacidade de memória	Intervalo de registo programável	Interface	Alimentação
CA 8332B	- 4 Entradas. -6 V a 960 V (fase-fase).	- P,S,Q. - FP. <i>-Flickers.</i>	- 2 Mb de memória.	-Entre 1 segundo e 15 minutos.	-RS232	-Bateria recarregável (autonomia de cerca de 30 horas) ou directamente ligado aos 230 V.
CA 8334B	- 4 Entradas. - 6 V a 480 V (fase-neutro).	-Desequilíbrios de tensão. -Harmónicos (até ao 50°).	- 4 Mb de memória.			
CA 8335	-4 Entradas. -10 a 1200 V.	-THD.	-Cartão SD de 2 Gb.		-USB.	

### **MEGABRAS- MAR 202**

O equipamento *MAR 202* é um equipamento dedicado ao controle a qualidade de energia que dispõe de entradas de tensão e corrente, uma bateria interna e porta de comunicação RS 232 ou RS 485. Este equipamento permite registrar os principais parâmetros eléctricos apresentando imunidade a transitórios e alterações provocadas por descargas atmosféricas e contém uma memória interna com capacidade de 1 Mb, tendo a opção de 3Mb (MEGABRAS). A figura 7 apresenta o aspecto físico do equipamento MAR 202.



Figura 7 – Analisador de QEE, MAR 202 (MEGABRAS).

### **IMC Polares**

O dispositivo IMC Polares, permite a análise da QEE sem qualquer necessidade de uma conexão com o computador, utilizando uma conexão via *ethernet* e *Transmission Control Protocol* (TCP/IP) para posterior exibição *online*. Este equipamento monitoriza parâmetros associados à QEE tais como, a frequência, harmónicos (até à ordem 50), inter-harmónicos (até à ordem 10), *flickers*, potências e o fluxo de energia. Esta monitorização da QEE é realizada de acordo com a norma NP 50160. O analisador IMC Polares cumpre ainda os requisitos de medição e precisão de acordo com a Classe A da norma IEC 61000-4-30 (IMC, 2012). A figura 8 mostra as características físicas do dispositivo IMC Polares.

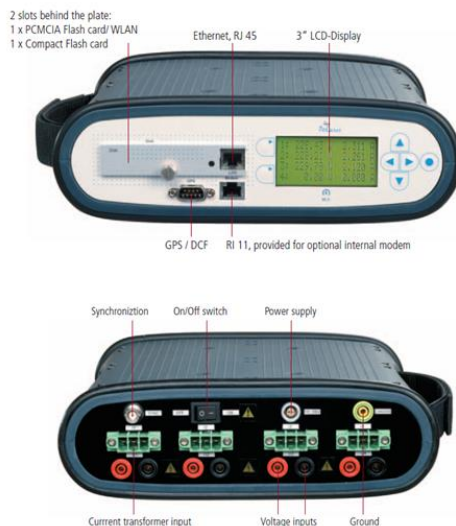


Figura 8 – Características físicas do equipamento IMC Polares (IMC, 2012).

De seguida são apresentados os equipamentos fixos que permitem a análise da QEE.

### ***Janitza Electronics***

A *Janitza Electronics GmbH* é uma empresa alemã que tem vindo activamente a desenvolver soluções de eficiência e monitorização de energia com o objectivo de reduzir custos com a mesma. Deste modo, fornece sistemas de gestão, equipamentos de medição, analisadores e soluções para a QEE.

O dispositivo UMG 96 RM é um analisador de QEE fixo que pode ser implementado na instalação eléctrica, com a particularidade de possuir um *display* na parte frontal.

A figura 9 apresenta o aspecto frontal do analisador de QEE da Janitza Electronics, distribuído pela empresa portuguesa FFONSECA (FFONSECA, 2010).



Figura 9 – Aspecto frontal do analisador de QEE da Janitza Electronics (FFONSECA, 2010).

O analisador de QEE UMG 96 RM apresenta um vasto conjunto de características, tais como:

- Medição da energia activa (kWh) e reactiva (kVAr).
- Análise de Harmónicos até à 63ª ordem.
- Gravação de picos de tensão, micro-interrupções e correntes de arranque.
- Gravação de eventos.
- Monitorização das condições em tempo real.
- Monitorizações de acordo com a norma de qualidade de energia EN50160.
- Comunicações: ModBus, RS232/485, *ethernet*, TCP/IP, http, *Domain Name System* (DNS) e *Universal System Bus* (USB).

O analisador de QEE apresenta ainda as vantagens de gravação de dados, a emissão de relatórios e envio de alarmes via *email* ou mensagem (*Short Message Service* (SMS)).

### ***ELSPEC G4000 BLACKBOX***

O analisador de QEE *ELSPEC G4000 BLACKBOX* permite a medição de parâmetros eléctricos, tais como a tensão corrente e potência, *flickers*, variações de curta duração, harmónicos (até à ordem 51) e picos de tensão. Apresenta uma memória interna de 8 Gb e a taxa de amostragem de 250 KHz com precisão de 0,1%. Este analisador possui ainda um *software* próprio que permite realizar a manipulação de dados provenientes da monitorização.

Todas as medições são realizadas de acordo conforme as normas IEC 61000-4-15, IEC 61000-4-30 e EN 50160. A figura 10 mostra o aspecto físico do analisador de QEE, *ELSPEC G4000 BLACKBOX*, fornecido pela empresa KRON (KRON, 2013).



Figura 10 – Aspecto físico do analisador de QEE, ELSPEC G4000 BLACKBOX (KRON, 2013).

De seguida serão apresentados alguns CIs especiais dedicados à monitorização da QEE.

### ***Cirrus Logic - CS5463***

O circuito integrado CS5463, da *Cirrus Logic*, é um dispositivo de alta precisão e de baixo custo que permite a monitorização de energia em redes monofásicas e/ou rede trifásicas de acordo com as normas *International Electrotechnical Commission (IEC)*, *American National Standards Institute (ANSI)* e *Institute of Electrotechnical and Electronics Engineers (IEEE)*.

O CS5463 possibilita a medição em tempo real do valor eficaz da corrente e tensão ( $I_{RMS}$  e  $V_{RMS}$ ), da componente fundamental das potências activa, reactiva, aparente, da componente harmónica da potência activa, do factor de potência, da frequência e da ocorrência de eventos transitórios de corrente e de tensão (Logic, 2013). Este circuito integrado contém dois *Analog-to-Digital Converter (ADC)*, um conversor energia-frequência e uma interface *Serial Peripheral Interface (SPI)* que permite a comunicação com um MicroControlador ( $\mu C$ ). A figura 11 mostra o aspecto do circuito integrado CS5463 da *Cirrus Logic*.



Figura 11 – Circuito integrado CS546X da *Cirrus Logic* (Logic, 2013)

### *MaximIntegrated – MAXQ3180*

O circuito integrado MAXQ3180 da *MaximIntegrated* foi concebido de modo possibilitar a monitorização de parâmetros associados à qualidade de energia em redes eléctricas a três fios ou a quatro fios. A tabela 6 mostra as características do circuito integrado MAXQ3180 da *MaximIntegrated*.

Tabela 6 – Características do circuito integrado MAXQ3180 (MaximIntegrated, 2013).

<b>Monitorização</b>	Potência activa, reactiva e aparente totais ou em cada fase.	A monitorização é realizada de acordo com as normas IEC 60687, IEC 61036 e IEC 61268
	Sobretensões e sobrecorrentes	
	Interrupções de tensão	
	<i>Zero-crossing detection</i>	
	Factor de potência	
	Energia activa, reactiva e aparente totais ou em cada fase.	
	Corrente do neutro	
	Frequência em cada fase	
	Desfasamento entre fases	
	Harmónicos de corrente e tensão.	
	Energia fundamental e total.	
<i>Serial Peripheral Interface (SPI)</i>		
<i>Analogic to Digital Converter (ADC) incorporado.</i>		

O circuito integrado MAXQ3180 permite a monitorização da energia através de um circuito interno sofisticado. No entanto, para aplicações específicas é necessário a reconfiguração externa do *hardware* através de componentes específicos (MaximIntegrated, 2013).

De seguida apresenta-se o analisador de qualidade de energia ADE7880 da *Analog Devices*.

### ***Analog Devices – ADE7880***

O circuito integrado *ADE7880* da *Analog Devices*, é um analisador da QEE de alta precisão com aplicação em sistemas de medição de energia, monitorização da qualidade da energia, inversores solares e dispositivos de protecção. É constituído por um ADC, um integrador digital, um circuito de referência e todo o processamento de sinal necessário para realizar a medição total (fundamental e harmónica) da energia activa e aparente, os cálculos das tensões eficazes e as medições fundamentais das energias activas e reactivas. Para além disso, este dispositivo calcula o valor eficaz dos harmónicos de correntes de neutro e fase e das tensões de fase, em conjunto com as potências activas, reactiva e aparente e o factor de potência.

Relativamente à detecção de harmónicos, o ADE7880 permite o cálculo da distorção harmónica em todas as fases até ao harmónico de ordem 63, e o cálculo da *Total Harmonic Distortion* (THD) para a corrente e tensão em todas as fases.

O ADE7880 apresenta as seguintes características:

- Monitorização em tempo real, *Adaptive Real Time Monitoring* (ARTM).
- O processamento dos sinais é realizado através do *Digital Signal Processing* (DSP).
- Permite a sua utilização nas diferentes configurações do sistema trifásico (estrela, triângulo ou a quatro fios).
- Contém registros de amostragem de forma de onda, que permitem o acesso a todas as saídas do ADC.
- A comunicação com o ADE7880 pode ser feita através de duas *serial interface*, SPI e *Inter-Integrated Circuit* (I2C).
- O acesso às saídas do ADC e a informações em tempo real podem ser feitos através de uma porta de captura de dados de alta velocidade, *High Speed Data Capture* (HSDC) em conjunto com a serial interface I2C.

Relativamente à normalização, o ADE7880 cumpre os requisitos para medições da Classe I e Classe II de acordo com a norma IEC 61000-4-7 (Analog Devices, 2012). A figura 12 mostra o pin-out do CI ADE7780.

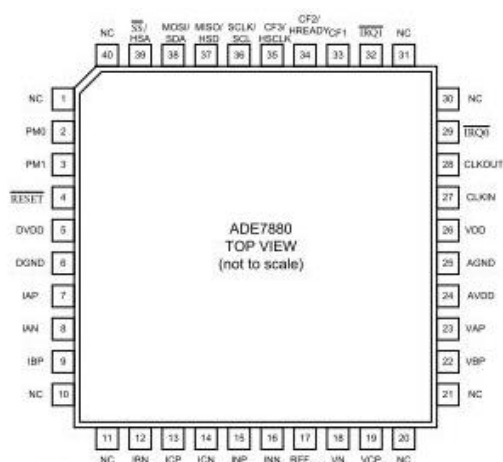


Figura 12 – Pin-out do circuito integrado ADE7880 (Analog Devices, 2012).

De seguida será realizada uma análise comparativa dos equipamentos e componentes estudados.

### 2.1.1. Análise comparativa

No contexto deste trabalho são distinguidos três tipos de equipamentos que são capazes de adquirir parâmetros relacionados com a QEE.

Como anteriormente referido, os *equipamentos portáteis* necessitam de ser transportados até um ponto da rede para realizarem a monitorização de parâmetros. Este tipo de equipamento são tradicionalmente caros face a outros equipamentos, sendo utilizados maioritariamente em indústrias. Apresentam uma interface de utilização intuitiva e um aspecto físico maior comparativamente com os CI especiais.

Os *equipamentos fixos* têm a vantagem de serem colocados num ponto da rede para monitorização, através de adaptadores próprios, e não precisarem assim de serem transportados sempre que se pretender monitorizar algum parâmetro. Estes equipamentos apresentam, tal como os *equipamentos portáteis*, um custo elevado comparativamente com os CI para monitorização da qualidade de energia. Apresenta uma interface intuitiva o que permite ao utilizador usufruir facilmente de todas as funcionalidades do equipamento.

Os *CI especiais* para monitorização de energia são componentes que apresentam um custo reduzido, face aos equipamentos indicados anteriormente, e podem ser associados a outros componentes para realizar a monitorização dos parâmetros associados à QEE. Estes componentes têm muitas das vezes associados a si um *software* intuitivo que permite a visualização dos parâmetros monitorizados. Quando aos associados a outros componentes, é possível obter os dados através da programação de todos os componentes. Os CIs apresentam um *datasheet* complexo com informação detalhada acerca das suas funcionalidades.

## 2.2. Aquisição e processamento de dados

A aquisição e processamento de dados envolvem a recolha de informação com o intuito de gerar dados que podem ser manipulados por um ou mais computadores. Os dados adquiridos são na maior parte das vezes monitorizados, analisados, através do uso de um *software*. A figura 13 ilustra o diagrama de um sistema de aquisição e processamento de dados.

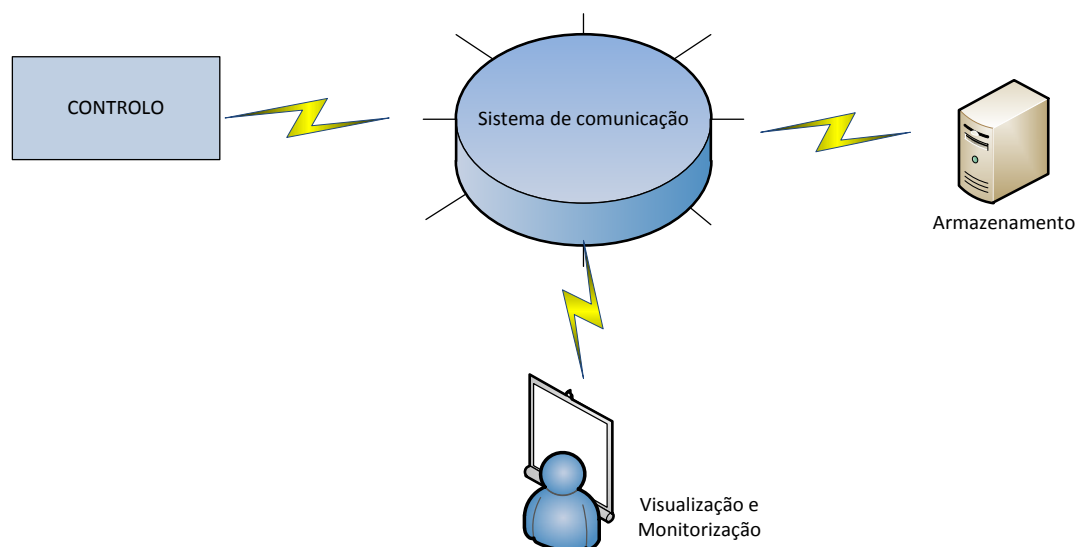


Figura 13 – Diagrama de blocos de um sistema de aquisição e processamento de dados.

A troca de dados é realizada através de pacotes *Transmission Control Protocol / Internet Protocol* (TCP/IP). O TCP/IP é um conjunto de protocolos de comunicação entre computadores em rede que é definido como um modelo de camadas, onde cada camada é

responsável por um grupo de tarefas, fornecendo um conjunto de serviços bem definidos para o protocolo da camada superior. A figura 14 mostra as camadas constituintes do modelo TCP/IP.



Figura 14 – Camadas constituintes do modelo TCP/IP

A comunicação entre os restantes módulos ficará a cargo de um servidor. Este deverá realizar duas funções. Por um lado deve aceitar pedidos de visualização de dados por parte de computadores remotos e por outro permitir a recepção constante de dados, através de pacotes TCP/IP, enviados pelo módulo de controlo e aquisição de dados. A figura 15 mostra a função do servidor relativamente ao módulo de controlo e aquisição de dados e a pedidos de visualização de dados por parte dos computadores remotos.

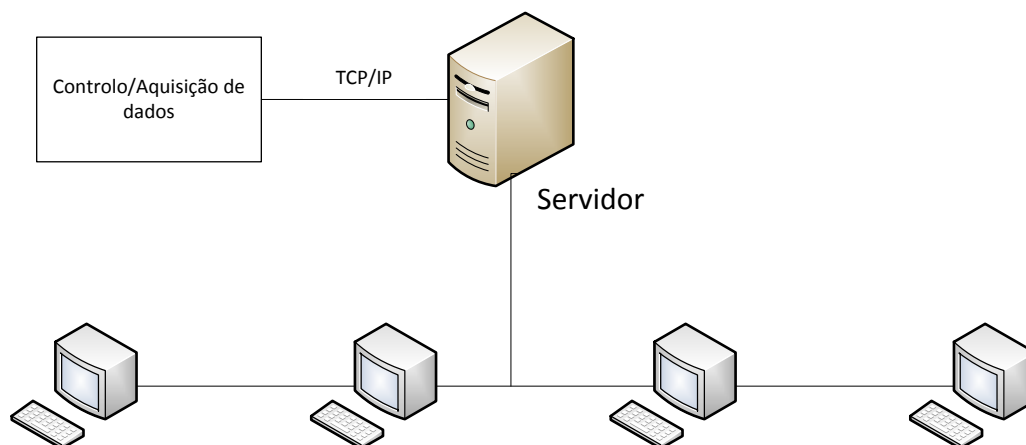


Figura 15 – Troca de dados entre os módulos de controlo e aquisição de dados e os computadores remotos.

Os dados provenientes do módulo de controlo e aquisição de dados são enviados para o servidor num ficheiro do tipo *.XML*. A linguagem *eXtensible Markup Language* (XML) foi criada pela *World Wide Web Consortium* (W3C) e surgiu da necessidade de criar uma linguagem de marcação para a criação de documentos com dados organizados de forma hierárquica. Os documentos XML são realizados em qualquer editor de texto mas não funcionam sozinhos, ou seja, necessitam de utilizar outras linguagens associadas de modo a receber e enviar informações adjacentes. A linguagem XML é uma linguagem cujas *tags* e estrutura são definidas pelo autor do documento. A linguagem XML possui assim muitas características das quais se destacam a sua simplicidade e clareza, tanto para humanos quanto para computadores e a possibilidade de criação de *tags* sem limitação

### **2.3. Plataforma *web***

O desenvolvimento da plataforma *web* envolve o protocolo *HyperText Transfer Protocol* (HTTP), um protocolo de comunicação entre sistemas de informação que permite a transferência de dados entre redes de computadores, incluindo em páginas *web* (kioskea, 2011). O protocolo HTTP está dividido em duas partes denominadas de *client-side* (cliente) e *server-side* (servidor) que são executados em máquinas diferentes e comunicam um com o outro por meio de mensagens HTTP. O HTTP define a estrutura destas mensagens e o modo como são trocadas entre o *client-side* e o *server-side*. A troca

de mensagens entre o cliente e o servidor é realizada de uma forma simples: o cliente faz uma requisição de uma página ao servidor através do protocolo HTTP e o servidor responde com a página solicitada. A figura 16 ilustra a troca de mensagens entre o *cliente-side* e o *server-side*.

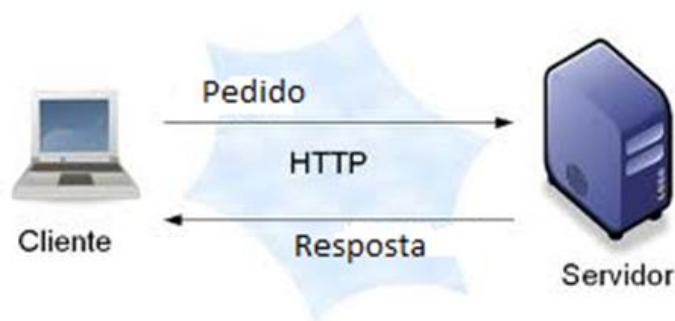


Figura 16 – Troca de mensagens entre o *cliente-side* e o *server-side*.

Seguidamente será apresentado o modo de funcionamento do lado do cliente e do lado do servidor.

### 2.3.1. Client-side

O *client-side* permite obter o *design* e a funcionalidade da página *web* através do uso de linguagens específicas.

As linguagens que podem ser utilizadas para obter as funcionalidades do lado do cliente vão ser expostas de seguida.

#### *Cascading Style Sheets*

A linguagem *Cascading Style Sheets* (CSS) é uma linguagem de estilo composta por camadas e utilizada para definir a apresentação em páginas *web* que adoptam para o seu desenvolvimento linguagens de marcação. A CSS define como serão exibidos os elementos contidos no código de uma página *web* e sua maior vantagem é realizar a separação entre o formato e o conteúdo de um documento (w3school, 2013). A título de exemplo pode-se analisar o excerto de código CSS da figura 17.

```
#teste {  
  
Background:#000000 // define a cor preta como  
fundo do título  
Padding:10px; //afastamento  
font-family: "arial"; // tipo de letra  
font-size:12pt; //tamanho da letra  
  
}
```

Figura 17 – Exemplo de um excerto de código CSS (w3school, 2013).

### ***HyperText Markup Language***

A *HyperText Markup Language* (HTML), é uma linguagem utilizada para conceber páginas na web, sendo constituída por um conjunto de *tags* que servem para definir a forma como se apresenta a página.

Os ficheiros HTML têm extensão *.html* e podem ser editados em qualquer editor de texto. A figura 18 apresenta, a título de exemplo a estrutura básica de um documento *.html*.

```
<html>  
<head>  
<title> Seja bem vindo</title>  
</head>  
<body>  
...Conteúdo da página  
</body>
```

Figura 18 – Excerto de ficheiro *.html* (HTML4BLOG, 2011).

As *tags* `<html>` `</html>` indicam ao navegador que o documento está redigido em linguagem HTML.

As *tags* `<head>` `</head>` indicam quais os comandos deverão ser lidos pelo navegador antes que a página seja carregada.

As *tags* `<title>` `</title>` definem um título a ser exibido na barra de título da janela do navegador.

As *tags* `<body>` `</body>` contém a restante da página, ou seja, corpo do documento (w3schools, 2013).

A linguagem HTML é uma linguagem simples de ser aprendida e usada. Para além de permitir disponibilizar informação, esta linguagem é a base para que outras linguagens possam realizar as suas funcionalidades.

### **JAVASCRIPT**

A linguagem *Javascript* permite a criação de páginas *web* interactivas e contém uma sintaxe muito semelhante á linguagem C, possuindo funções e métodos de alto nível, o que facilita a sua programação. Esta linguagem oferece funcionalidades a uma página *web* do ponto de vista do cliente. A estrutura da linguagem Javascript pode ser implementada num ficheiro *html* como mostra o excerto de código da figura 19.

```
<html>
<head><script type = "text/javascript">
function message() {
alert("Mensagem aparece quando a página
carrega!");}
</head> </script>
<body onload = "message()">
</body></html>
```

Figura 19 – Excerto de código Javascript implementado num ficheiro html (w3school, 2013).

O exemplo anterior apresenta a estrutura básica do código Javascript incorporada num ficheiro html. As tags <script> e </script> delimitam o código e a tag <script type = "text/javascript"> possui o atributo da linguagem utilizada (w3school, 2013).

Seguidamente serão apresentadas as funcionalidades do *server-side*.

#### **2.3.2. Server-side**

O *server-side* possibilita a realização do pedido feito por parte do *client-side*, ou seja, a interface entre os dados e o cliente. O código executado no servidor permite gerar a página dinamicamente e permitindo a apresentação de uma página ao cliente. O desenvolvimento do *server-side* requer a utilização de linguagens específicas tais como, *PHP*, *ASP*, *Ruby*, *Java* e *.Net*.



### 3. Conceitos associados à qualidade de energia eléctrica

O conceito QEE apresenta uma elevada preocupação para todos os agentes envolvidos no Sistema Eléctrico de Energia (SEE), desde a produção, transporte e distribuição, consumidores industriais, comerciais e residenciais. A degradação da QEE apresenta vastos problemas quando desconsiderados ou inculcados, conduzindo a inúmeros problemas, sendo estes, perda de produção, avaria de equipamentos, aumentos de custos com a energia e o aumento do risco da segurança pessoal. Para assegurar a qualidade da energia e minimizar estes problemas torna-se necessário monitorizar frequentemente, utilizando equipamentos necessários e utilizar procedimentos de manutenção adequados a cada equipamento.

Nos subcapítulos seguintes serão expostos conceitos e normas associados à QEE.

### 3.1. Conceitos associados à qualidade de energia

O conceito de QEE foi utilizado, pela primeira vez, numa publicação feita pela Marinha dos Estados Unidos em 1968, na qual se analisavam as especificações de equipamento electrónico relativas à alimentação. Actualmente, a definição de QEE possui significados e interpretações diferentes consoante as necessidades dos clientes envolvidos, indo ao encontro do que se encontra formalmente estabelecido nas respectivas normas.

A QEE está relacionada com um conjunto de fenómenos que podem ocorrer no sistema eléctrico e está associado a todos os problemas de energia manifestados na tensão, corrente ou em variações de frequência resultantes de uma falha ou má operação de equipamentos de consumidores. Estes problemas podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou nos sistemas de abastecimento de energia, devido à utilização de cargas não lineares e dos equipamentos utilizados possuem uma maior sensibilidade a distúrbios da QEE (Baptista, et al., 2008). Deste modo, para análise do impacto dos problemas de QEE é necessário abordar dois temas, que são imprescindíveis e que necessitam de ser assegurados para que haja qualidade de energia eléctrica, nomeadamente:

- Continuidade de tensão (ou continuidade de serviço).
- Qualidade de onda de tensão.

Relativamente à *continuidade de tensão*, esta refere-se à fiabilidade do abastecimento contínuo da tensão, caracterizada pelo número e duração das interrupções de fornecimento de energia eléctrica.

Quanto à *qualidade de onda de tensão* dever ser representada pela amplitude, frequência e simetria do sistema trifásico de tensões. Deste modo, as formas de onda de tensão devem ser sinusoidais, com frequência de 50 Hz /60 Hz e desfasadas de 120° no tempo. Na figura 20 podemos observar um sistema trifásico equilibrado com as características anteriormente referidas (QEnergia, 2001).

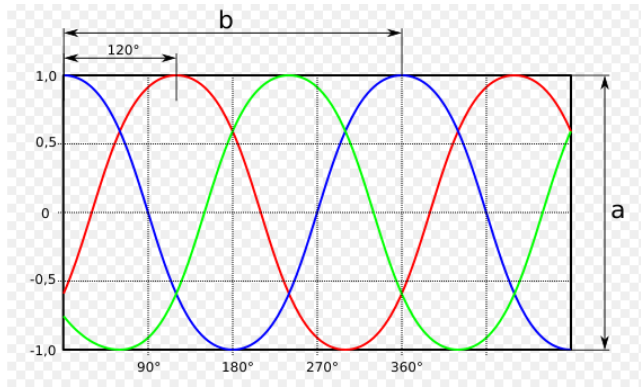


Figura 20 - Sistema trifásico equilibrado.

De seguida aborda-se a origem das perturbações associadas à QEE.

### ***A origem das perturbações da qualidade de energia eléctrica***

Durante anos a maioria dos equipamentos ligados à rede de energia eléctrica utilizavam *cargas lineares*, robustas e pouco poluidoras. Com a evolução da electrónica de potência os equipamentos apresentaram um melhoramento a nível do rendimento e concretização de tarefas. Contudo, esses equipamentos funcionavam apenas com *cargas não lineares* que expuseram a rede eléctrica a uma “poluição” que as cargas lineares não expunham.

As perturbações da QEE advêm da utilização de *cargas não lineares* nos equipamentos usados nos sistemas eléctricos. Os equipamentos que utilizam cargas não lineares permitem o uso mais eficiente da electricidade e o controlo mais preciso sobre os processos, mas simultaneamente trouxeram perturbações muito significativas à QEE. Estas perturbações derivam do facto destas cargas consumirem correntes não sinusoidais e consequentemente introduzirem, na rede eléctrica, harmónicos.

A figura 21 apresenta uma fonte de alimentação comutada, que é um exemplo de um sistema de carga não linear e que pode dar origem à forma de onda da corrente e tensão da figura 22.

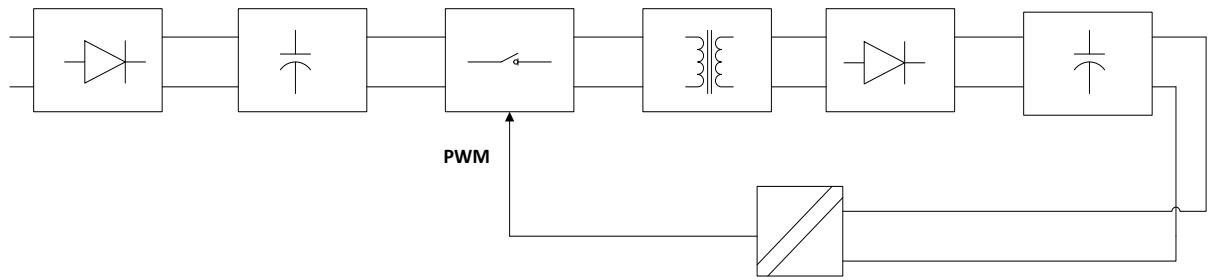


Figura 21 – Fonte de alimentação comutada.

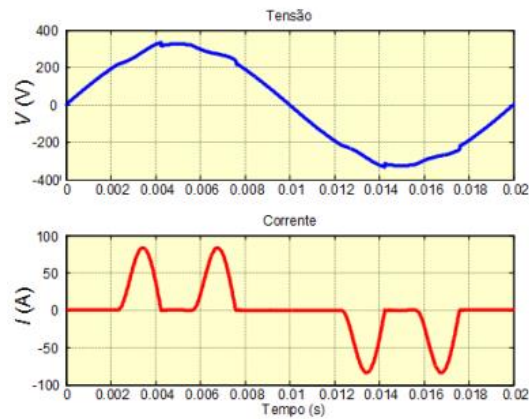


Figura 22 – Forma de onda da tensão e corrente de um sistema com carga não linear (EDP, 2005).

Contrariamente às cargas não lineares, os sistemas com *cargas lineares* são compostos por circuitos resistivos, capacitivos e indutivos. Estes quando alimentadas com uma tensão sinusoidal consomem correntes também sinusoidais e da mesma frequência. A figura 23 a forma de onda da tensão e corrente de um sistema com carga linear.

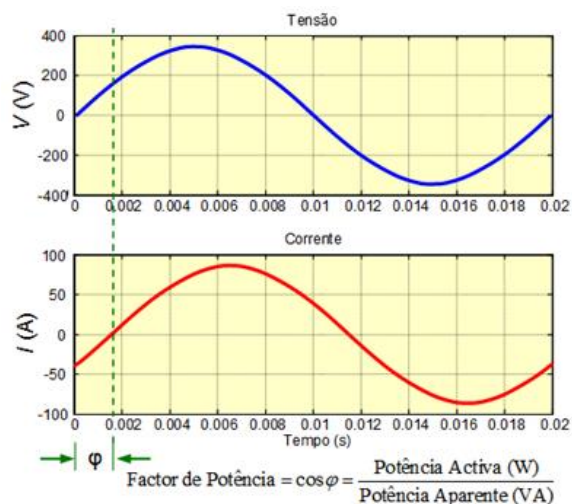


Figura 23 - Forma de onda da tensão e corrente de um sistema com carga linear (EDP, 2005).

### *Locais de perturbação da qualidade de energia eléctrica*

Genericamente o SEE é constituído por um sistema interligado que vai desde a geração de energia, o transporte e distribuição, até ao consumo da mesma. A maior parte da energia eléctrica é produzida nas instalações de produção de grande capacidade, projectadas de modo a terem uma capacidade de reserva, capaz de responder a um aumento de carga no sistema sem que se verifiquem nenhuma anomalias à saída do centro de produção.

No entanto, desde as centrais electroprodutoras até ao consumidor, a energia eléctrica pode sofrer diversas perturbações, provocando uma deterioração da sua qualidade, quer na rede de transporte, quer na rede de distribuição, quer no seu consumo final. Na figura 24 podemos verificar as zonas onde pode existir a degradação da QEE.

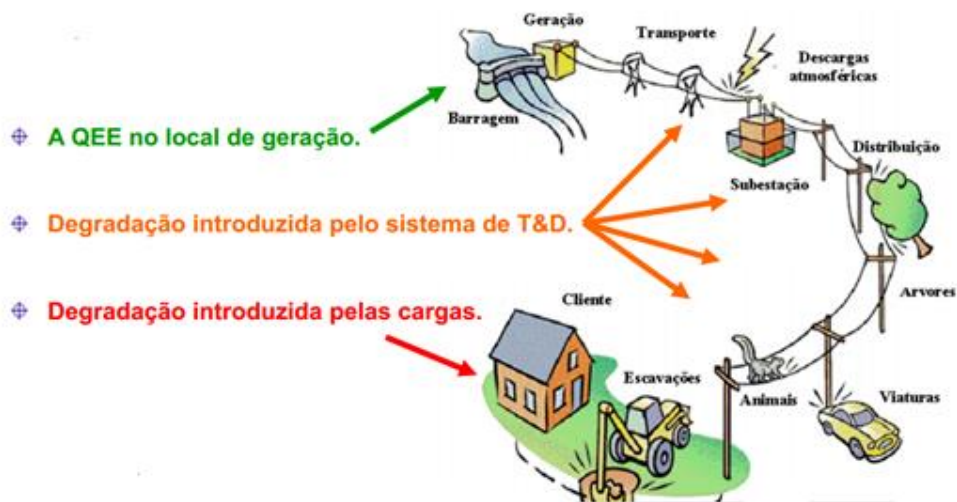


Figura 24 – Zonas de degradação da QEE no sistema eléctrico de energia (EDP, 2005).

De seguida aborda-se cada um dos casos apresentados anteriormente.

#### • **Perturbações nos sistemas de transporte**

A energia eléctrica, à saída dos centros de produção, é injectada nos sistemas da rede de transporte a Alta Tensão (AT) ou Muito Alta Tensão (MAT), na ordem dos 150 kV, 220 kV e 400 kV. Este aumento significativo da tensão permite o aumento da capacidade de transporte de energia eléctrica e a diminuição de perdas nas linhas de transporte.

As perturbações da qualidade da energia condicionam o sistema de transporte e provêm de um conjunto de factores, entre os quais:

- Condições climatéricas.
- Descargas atmosféricas.
- Outros factores.

As *condições climatéricas* provocam oscilações laterais nos postes das linhas de transporte aéreas e posteriormente a variação das indutâncias das linhas. As *descargas atmosféricas* originam ainda picos de tensão de amplitude elevada, o que origina o disparo dos aparelhos de protecção e ainda a interrupção do fornecimento de energia. A ocorrência destas

descargas deve-se ao facto das redes de transporte estarem posicionadas a uma altura significativa e por serem constituídas por material condutor.

Devido ao local onde se encontram, os sistemas de transporte estão ainda sujeitos a tempestades, acidentes, árvores e animais, etc. Esta exposição provoca a acumulação de poluição e humidade nos isoladores da linha de transporte podendo provocar curto-circuitos. Na figura 25 é apresentada uma linha de transporte de energia eléctrica.



Figura 25 – Linhas de transporte de energia eléctrica

- **Perturbações nos sistemas de distribuição**

Nos sistemas de distribuição a energia eléctrica é reduzida a Média Tensão (MT) 6 kV, 10 kV, 15 kV e 30 kV.

Durante o percurso nas linhas de distribuição, a energia eléctrica sofre transformações de modo a adaptar-se à alimentação pretendida pelo cliente final. Estas reduções sucessivas da tensão são realizadas utilizando transformadores, o que implica adições sucessivas de impedâncias com particularidades não lineares desde os geradores das centrais electroprodutoras até às cargas finais. Toda a utilização destes aparelhos aumenta a probabilidade de ocorrência de perturbações da QEE devido às impedâncias não lineares injectadas na rede (Oliveira, et al., 2004).

A distribuição de energia pode ser feita em linhas aéreas e linhas subterrâneas e ambas estão sujeitas a factores que podem originar a perda da QEE. As *linhas aéreas* estão sujeitas a condições atmosféricas, desde tempestades, descargas atmosféricas e a interferências de árvores, humanos, animais etc. Todos estes factores são susceptíveis de prejudicar os sistemas eléctricos conduzindo todo o equipamento de destruição à ruptura e posterior interrupção da energia.

A distribuição de energia também pode ser feita através de *linhas subterrâneas*. Tal como as linhas aéreas, também as linhas subterrâneas estão expostas a agentes que podem levar à degradação da QEE. A degradação pode ser proveniente de acidentes de trabalhos de escavação e de construção civil, resultantes de obras de escavação. A figura 26 apresenta parte de uma rede subterrânea de distribuição de energia eléctrica.



Figura 26 – Rede subterrânea de distribuição de energia eléctrica.

As perturbações nas redes de distribuição são muito mais complexas pois as redes estão mais próximas do consumidor final. Por estes motivos, uma perturbação da QEE num ponto da rede de distribuição pode ter consequências prejudiciais nos equipamentos das linhas bem como nos equipamentos do lado do consumidor.

- **Perturbações nas instalações dos consumidores de energia**

Nas instalações do cliente a tensão alimentação é a pretendida pelo mesmo. Neste ramal da rede do SEE, as perturbações registam-se nos postos de transformação do cliente ou nas suas instalações. Os *postos de transformação* estão sujeitos a diversas situações que degradam a QEE. As condições climatéricas, que podem provocar descargas atmosféricas e originar picos de tensão de amplitude elevada, originam o disparo dos aparelhos de

protecção e ainda a interrupção do fornecimento de energia, ficando ainda sujeitas a complicações físicas, acidentes ou mesmo intromissão humanos.

Nas *instalações do consumidor*, a QEE pode sofrer alterações devido ao tipo de equipamentos que o consumidor está a utilizar e do tipo de consumidor que se trata (por exemplo se é uma indústria o tipo de equipamentos utilizado tem outras características do que os equipamentos de um consumidor residencial).

### **3.1.1. As perturbações da QEE**

Os critérios que definem a QEE não são critérios uniformes. Por exemplo para um utilizador doméstico a qualidade da energia analisa-se através da iluminação. No entanto, para um utilizador industrial ou para hospital os critérios que definem esta qualidade diferem. Esta análise das perturbações da QEE envolve o funcionamento incorrecto de diferentes equipamentos e deste modo torna-se imprescindível caracterizar e definir essas perturbações. Deste modo, a normalização associada à QEE, que será abordada adiante, define um conjunto de fenómenos relacionados com as perturbações ocorridas na rede de energia. Estas perturbações vão ser, por sua vez, abordadas nos subcapítulos seguintes.

#### **3.1.1.1. Interrupções**

Entende-se como *interrupção*, um fenómeno eléctrico em que a tensão de alimentação no ponto de entrega é inferior a 1% da tensão declarada  $U_c$  e pode ser classificada como *prevista* ou *acidental*.

Uma *interrupção prevista* ocorre quando os clientes são informados com antecedência, para permitir a execução de trabalhos programados na rede de distribuição enquanto que, uma *interrupção acidental* ocorre devido a defeitos permanentes ou transitórios, na sua maioria associados a acontecimentos externos, a avarias ou a interferências.

Uma *interrupção acidental*, é classificada de acordo com a sua duração, podendo ser, por sua vez, longa ou breve. Uma *interrupção longa* tem duração superior a três minutos e é provocada por um defeito permanente. Por sua vez uma *interrupção breve* tem duração

inferior ou igual a três minutos e é provocada por um defeito transitório. A figura 27 ilustra a ocorrência de uma interrupção da tensão.

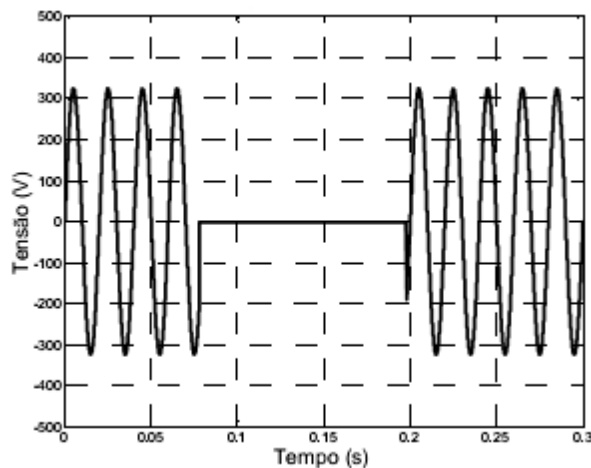


Figura 27 – Interrupção de tensão (EDP, 2005).

### ***Origem das interrupções***

A origem das interrupções ocorre normalmente nos sistemas Transporte e Distribuição (T&D) ou nas instalações dos consumidores e são associados a defeitos no isolamento.

Relativamente aos sistemas T&D, os defeitos do isolamento são provocados por causas internas ou externas. As causas externas são devidas às condições atmosféricas, a interferências de árvores e animais com condutores eléctricos, a contornamentos de isoladores em consequência de poluição e a situações acidentais (ex. colisões de veículos, ruptura de cabos subterrâneos durante trabalhos de construção civil etc). Já as causas internas ocorrem devido a degradação de isolamentos nos cabos, nos transformadores e noutros elementos do sistema eléctrico.

Nas instalações dos consumidores, as interrupções podem ser provocadas por falhas de isolamento em equipamentos, avarias em equipamentos de utilização final de energia e o incorrecto dimensionamento das protecções dos equipamentos eléctricos.

### ***Consequências das interrupções***

As consequências das interrupções dependem das características dos equipamentos, da duração das interrupções e da tecnologia utilizada nos equipamentos do consumidor. Antigamente, as cargas não eram susceptíveis a danos decorrentes da ocorrência de

interrupções no fornecimento de energia eléctrica. No entanto, actualmente as interrupções podem levar à paragem de equipamentos, podendo mesmo causar elevados prejuízos. Mesmo interrupções que tenham uma duração de centésimas de segundos podem provocar paragens de algumas horas em linhas de produção, devido aos elevados tempos de rearranque de todos os processos de produção, implicando perdas de produção e consequentes prejuízos financeiros.

### ***Mitigação das Interrupções***

As principais formas de mitigação para a ocorrência das interrupções no fornecimento de energia eléctrica aos equipamentos são a melhoria dos sistemas T&D de energia eléctrica ou a adopção de sistemas de alimentação auxiliares nas instalações dos consumidores.

No que se refere ao melhoramento das redes T&D, este pode ser desenvolvido a três grandes níveis, sendo estes:

- Redução da duração das interrupções.
- Redução do número de interrupções.
- Melhoria da topologia da rede.

A *duração das interrupções* pode ser reduzida através do uso de fusíveis limitadores de corrente e de disjuntores com a capacidade de religação automática.

A *redução do número de interrupções* passa pela eliminação de factores que estão na origem de defeitos de isolamento e avarias de equipamentos. Assim, neste contexto podem ser adoptadas medidas que levam à substituição de linhas aéreas por linhas subterrâneas, a utilização de cabos isolados para as linhas aéreas, o aumento do isolamento dos condutores, a manutenção dos corredores das linhas e a instalação adicional de cabos de guarda.

Para a *melhoria da topologia da rede*, a estratégia a adoptar é a aplicação da redundância nos componentes do sistema, isto implica que se um componente falhar, os consumidores poderão ser abastecidos por outros componentes da rede.

As intervenções nas instalações dos clientes são realizadas ao nível da redução do número e duração das interrupções através da instalação de sistemas de alimentação auxiliares, tais como, grupos electrogeradores, para alimentação de cargas críticas e situações de emergência e no caso das cargas com necessidades de funcionamento permanente devem ser instalados sistemas de alimentação permanente, onde se incluem as convencionais

*Uninterruptible Power Supply* (UPS) com armazenamento de energia em baterias electroquímicas.

### 3.1.1.2. Cavas de tensão

Entende-se por *cava de tensão*, um fenómeno eléctrico onde ocorre uma diminuição brusca de tensão de alimentação para um valor situado entre 90% e 1% da tensão declarada  $U_c$ , seguida do restabelecimento da tensão depois de um curto lapso de tempo, como podemos ver na figura 28.

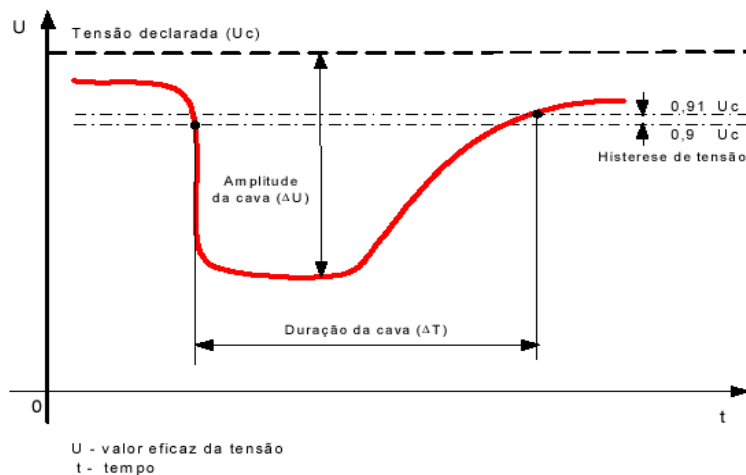


Figura 28 – Efeito de uma cava de tensão numa onda de tensão (EDP Distribuição, 2007).

A norma portuguesa EN 50160, define cava de tensão como,

“...Por convenção, uma cava de tensão dura 10ms a 1min. O valor de uma cava de tensão é definido como sendo a diferença entre a tensão eficaz durante a cava de tensão e a tensão declarada. As variações de tensão que não reduzam a tensão de alimentação a um valor inferior a 90% de  $U_c$  não são consideradas como cavas de tensão.” (CENELEC, 2001)

#### **Origem das cavas de tensão**

A origem das cavas de tensão está associada a imperfeições no isolamento dos sistemas T&D, a avarias nos reguladores de tensão e a ligações de cargas nas instalações do consumidor final e defeitos na mesma.

Para melhor compreendermos a origem de uma cava de tensão podemos examinar o exemplo da figura 29.

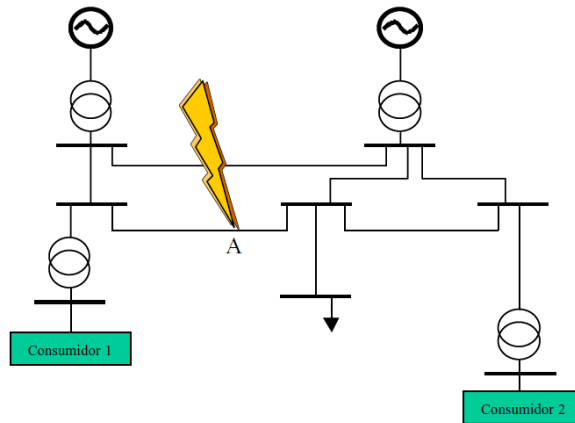


Figura 29 – Origem de uma cava de tensão num sistema T&D (EDP Distribuição, 2007).

Suponha-se que no ponto A existiu uma perturbação cuja origem é desconhecida e que pode ser uma das que já mencionamos anteriormente. No momento da perturbação a tensão fase/neutro passa a zero. No entanto, como a impedância da linha entre o ponto A e os consumidores é nula a tensão decresce bruscamente mas nunca se anula (EDP, 2005).

Os defeitos na rede, por exemplo um curto-circuito, provocam correntes elevadas, originando um abaixamento da tensão nas linhas mais próximas, sendo que a linha onde ocorre o curto-circuito é desligada pelos aparelhos de protecção. Dá-se portanto, a origem a uma cava de tensão com uma maior profundidade nos locais mais próximos do defeito, diminuindo à medida que nos afastamos do local do defeito.

A ligação de uma carga de grande potência na rede provoca uma maior queda de tensão que pode ultrapassar os valores mínimos permitidos, originando assim uma cava de tensão. É o exemplo de um motor de indução, onde a corrente de arranque poder ser cinco a seis vezes superior à corrente nominal.

### *Consequências das cavas de tensão*

Uma cava de tensão tem efeitos evidentes em alguns equipamentos utilizados pelo consumidor final tais como, motores de indução, motores síncronos, equipamentos electrónicos, *Variadores Electrónicos de Velocidades (VEV)*, *contactores* e *sistemas de iluminação*.

Relativamente aos *motores de indução*, as cavas de tensão traduzem-se a uma grande diminuição do binário e consequente redução da velocidade de rotação. Tal deve-se ao facto do binário dos motores de indução ser proporcional ao quadrado da tensão de alimentação.

Os motores síncronos são habitualmente aplicados em cargas de grande potência, como é o caso das indústrias cimenteiras ou mineiras. Contrariamente aos motores de indução, os motores síncronos apresentam um binário proporcional à tensão de alimentação. Assim, o aparecimento de uma cava de tensão não origina uma redução do binário tão acentuada como nos motores de indução. É importante ter em consideração que a diminuição de velocidade nos motores síncronos pode conduzir à perda de sincronismo e à consequente interrupção de funcionamento.

O elemento mais sensível às perturbações da QEE é o equipamento electrónico. Este está presente num grande número de aplicações que vão desde a informática até a aplicações electromecatrónicas.

A prossecução de uma cava de tensão, no circuito de alimentação de um equipamento electrónico, gera uma redução da tensão no barramento de alimentação contínua. Em função da capacidade do regulador de tensão, é possível manter a tensão de saída aproximadamente constante, desde que a tensão de entrada mínima esteja dentro dos limites do regulador quando tal não acontece.

Os *VEV* incluem vários andares constituídos por um rectificador, um filtro DC e um inversor. O impacto das cavas de tensão sobre estes variadores tem consequências a vários níveis. As alterações na tensão de alimentação provocam a suspensão do funcionamento do *VEV*, sendo que, a diminuição da tensão no barramento DC pode pôr em causa o funcionamento eficaz do inversor. As variações do binário não são muita das vezes toleráveis pelo processo produtivo o que consequentemente leva à interrupção do funcionamento do *VEV*.

A figura 30 mostra o esquema eléctrico de um *VEV*, onde estão identificados os vários componentes que fazem parte da sua constituição.

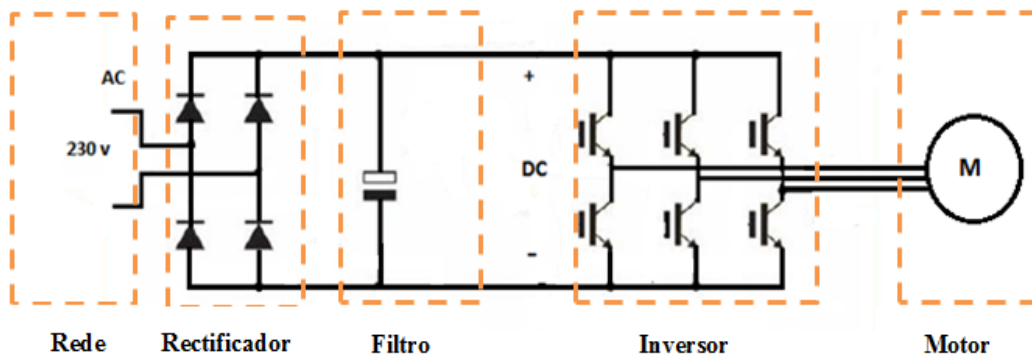


Figura 30 – Esquema eléctrico de um VEV.

Os *contactores* são utilizados para o comando dos motores de indução. A ocorrência de uma cava de tensão e possível interrupção da alimentação, conduz imediatamente à abertura do contactor e à interrupção do motor de modo a evitar o seu arranque súbito. Este tipo de contactor é também bastante sensível a cavas de tensão, com amplitude reduzida, levando à interrupção dos processos mesmo que a cava de tensão não seja perceptível pelo motor. A figura 31 mostra o esquema eléctrico de um contactor utilizado no comando de um motor.

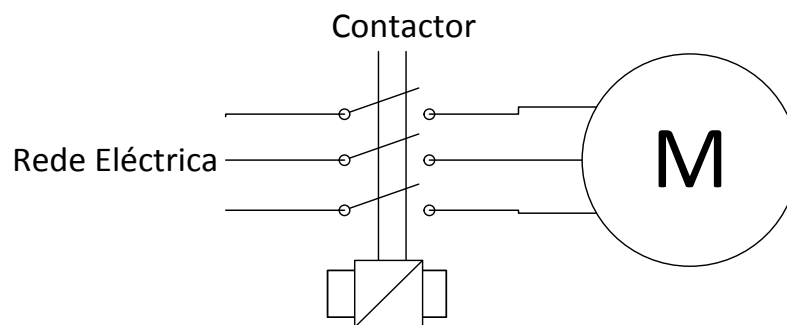


Figura 31 – Esquema eléctrico de um contactor utilizado no comando de um motor.

Os *sistemas de iluminação* também padecem de consequências provenientes da origem de uma cava de tensão. Neste caso, as cavas de tensão provocam a diminuição de luminosidade e o conseqüente desconforto nos utilizadores.

### ***Mitigação das cavas de tensão***

Na mitigação das cavas de tensão é indispensável a adopção de estratégias de imunização dos equipamentos das instalações do cliente e de intervenção nos sistemas T&D.

A nível dos *sistemas T&D* podem ser adoptadas medidas com vista à redução do número de ocorrências e da severidade das cavas de tensão. Pode-se optar pelo aumento da potência de curto-circuito num determinado ponto da rede e assim será menor a propagação da cava de tensão até esse ponto.

A intervenção nas instalações do cliente é realizada através da utilização de tecnologias orientadas para a mitigação das cavas de tensão. Alguns exemplos destas tecnologias são os transformadores de tensão constante ou transformador ferro-ressonante, equipamentos de alimentação interrupta, tais como UPS estáticas e os *Dynamic Voltage Restorers* (DVR).

As *UPS estáticas* são sistemas destinados à alimentação de dispositivos eléctricos quando existe um corte de energias de rede. São utilizadas para proteger equipamentos cuja interrupção de funcionamento possa causar danos irreversíveis em sistemas, dados ou negócios.

Os *DVRs* são, tal como as UPS, equipamentos usados para suportar, ou restaurar, uma carga eléctrica durante a ocorrência de eventos que provoquem abaixamentos e/ou interrupção da tensão de alimentação.

#### **3.1.1.3. Sobretensões**

Uma *sobretensão* é um fenómeno eléctrico que ocorre quando a rede eléctrica ou qualquer outra fonte de electricidade excede o seu valor nominal. A ocorrência deste fenómeno tem como consequência a possibilidade de danificar os componentes ligados à rede eléctrica ou de prejudicar a sua correcta exploração, caso não forem tomadas medidas de protecção adequadas.

As sobretensões podem ser classificadas como *internas* ou *externas* ao SEE. O primeiro tipo de sobretensões ocorre devido a manobras de disjuntores, a propagações de correntes harmónicas no sistema e de fenómenos de ressonância. No caso das sobretensões de origem externa, estas resultam de descargas atmosféricas, do efeito de campos electromagnéticos e de condições atmosféricas adversas.

As sobretensões são ainda classificadas como *transitórias* ou *permanentes*. O primeiro tipo é de curta duração, na ordem de microssegundos e pode ser provocado por descargas atmosféricas ou por manobras na rede. No caso das sobretensões permanentes, estas apresentam uma duração longa como consequência de grandes manobras e avarias na rede de distribuição devido a quedas de árvores, condições atmosféricas etc. A figura 32 mostra o gráfico de uma sobretensão transitória.

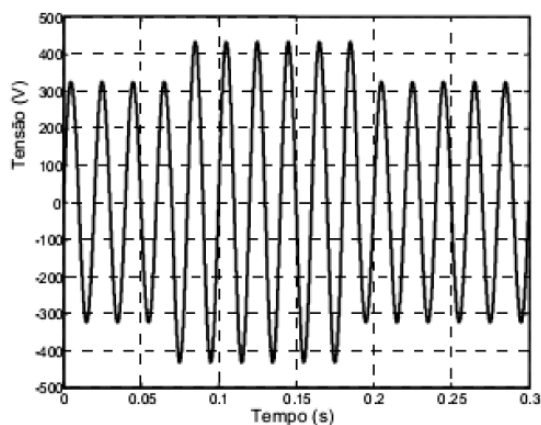


Figura 32 – Sobretensão transitória (Martins, et al., 2003).

### ***Origem das sobretensões***

A origem das sobretensões está relacionada com fenómenos entre os quais se destacam,

- Descargas atmosféricas.
- Descarga electrostática.
- Sobretensões transitórias devidas a comutação de linhas e/ou cargas.
- Defeitos no isolamento.

Uma *descarga atmosférica* ocorre devido à posição elevada das linhas de distribuição em relação ao solo e por este motivo, estas estarão mais susceptíveis a descargas. A sobretensão provocada por uma descarga atmosférica pode ser bastante elevada de acordo com a impedância da linha. Com a ocorrência de uma descarga atmosférica, pode originar-se a indução de uma sobretensão na linha devido aos efeitos electromagnéticos provocados pela corrente de descarga. Neste caso, quando a descarga ocorre perto de uma instalação eléctrica, o potencial da terra pode subir, naquele ponto, e assim originar uma sobretensão em relação ao potencial do transformador colocado num sítio mais distante. A figura 33 mostra a sobretensão resultante da elevação do potencial da terra.

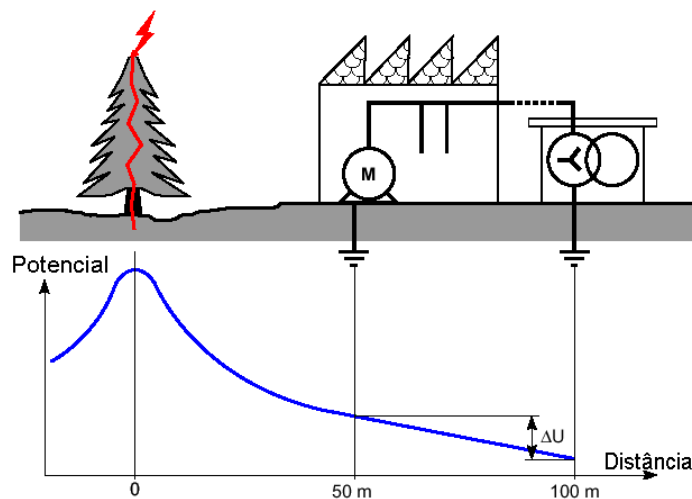


Figura 33 – Sobretensão resultante da elevação do potencial de terra (Caçote, 2012).

As *descargas electrostáticas* sucedem de alguns equipamentos, até mesmo pela mão humana, que são capazes de adquirir carga eléctrica que quando em contacto com alguns componentes mais sensíveis provocam a sua destruição

As *sobretensões transitórias* surgem devido à comutação de linhas ou cargas, quando se realiza a comutação de uma bateria de condensadores ou quando se inicia a circulação ou corte de uma corrente indutiva ou interrupção muito rápida de uma corrente de curto-circuito. No caso da comutação de uma bateria de condensadores, ocorre uma sobretensão transitória de baixa frequência, quando se inicia a circulação ou corte de uma corrente indutiva, por exemplo o arranque de motores de indução.

Os *defeitos do isolamento* provocam sobretensões à frequência do sistema eléctrico (50Hz ou 60Hz). Este tipo de perturbações ocorre quando existe um curto-circuito entre uma fase e o neutro ou um curto-circuito entre uma fase e a terra. A descontinuidade do condutor de neutro numa instalação trifásica desequilibrada origina sobretensões nas fases em que a tensão simples atinge valores da tensão composta e pode provocar problemas em equipamentos monofásicos.

### ***Consequências das Sobretensões***

As sobretensões podem perturbar o funcionamento de equipamentos sensíveis ou conduzir à destruição de alguns componentes eléctricos e electrónicos. Deste modo, distinguem-se os circuitos de comando que sofrem interferências electromagnéticas resultantes de sobretensões de alta frequência e os circuitos de comando que são sujeitos a sobretensões directamente através do circuito de alimentação.

### ***Mitigação das sobretensões***

Tendo em consideração o potencial de estrago das sobretensões, devem ser adoptadas estratégias de mitigação. Deste modo, a mitigação de sobretensões pode ser realizada em dois locais distintos, sendo estes:

- Redes T&D.
- Entrada das instalações dos consumidores.

Relativamente às *redes T&D*, podem ser utilizados cabos de guarda<sup>1</sup> que, devido à sua posição em relação à terra e aos cabos condutores, atraem para si as descargas atmosféricas. A figura 34 mostra a utilização de cabos de guarda numa rede T&D.

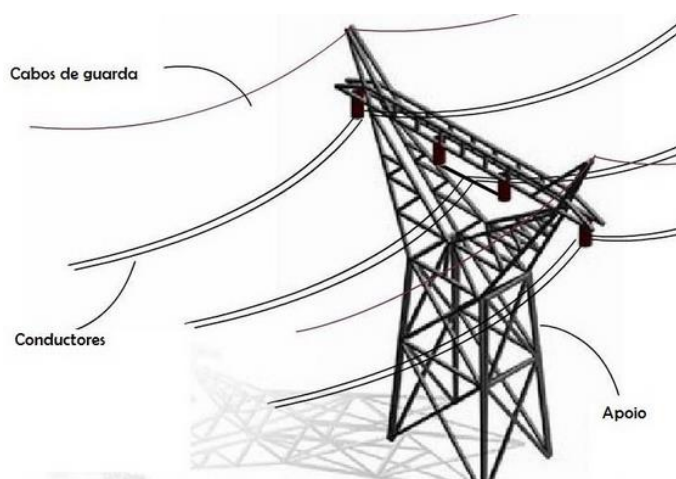


Figura 34 – Utilização de cabos de guardas numa rede T&D.

---

<sup>1</sup> **Cabos de guarda** - desempenham uma função de blindagem dos condutores às descargas atmosféricas e de interligações das terras dos apoios e das subestações extremas

No que diz respeito à mitigação na *entrada das instalações dos consumidores*, pode-se implementar dispositivos destinados a proteger os equipamentos eléctricos contra as subidas de tensão, tais como pára-raios e *Voltage Dependent Resistor* (VDR).

Os *pára-raios* são empregues de modo a conter as descargas atmosféricas e devem ser instalados o mais próximo possível das cargas a proteger, entre a possível origem do defeito e a carga.

As *VDRs* são dispositivos que têm uma resistência não linear e quando a tensão aumenta nos seus terminais provoca uma queda dessa resistência. Quando ligada, por exemplo entre a fase e terra, dá-se a fuga da corrente para terra protegendo deste modo o equipamento. A figura 35 apresenta o símbolo eléctrico de uma VDR.

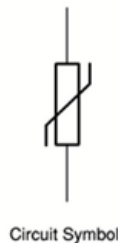


Figura 35 – Símbolo eléctrico de uma *Voltage Dependent Resistor*.

#### 3.1.1.4. Flutuações de tensão

Conceitualmente, as *flutuações de tensão* são definidas como variações repetitivas, e aleatórias na onda de tensão, provocadas pela operação de cargas com características de alterações rápidas e bruscas nas magnitudes da potência reactiva e activa. A normalização associada à QEE define as flutuações de tensão como,

“...*variações repetitivas, aleatórias ou esporádicas do valor eficaz da tensão de fornecimento, provocadas pela operação de cargas capazes de produzir componentes de frequências inter-harmónicas nos sinais de tensão das redes de energia eléctrica*” (CENELEC, 2001).

A figura 36 mostra a ocorrência de uma flutuação numa onda de tensão.

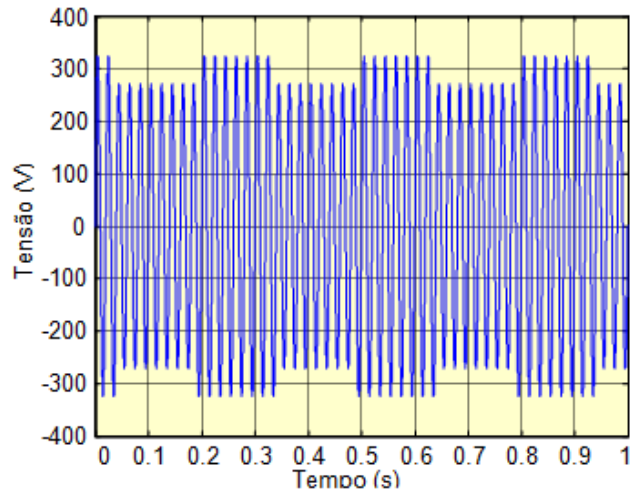


Figura 36 – Flutuação de tensão (EDP, 2005).

Associado ao fenómeno das flutuações de tensão, está o fenómeno de *tremulação (flicker)* que é a impressão de instabilidade da sensação visual provocada por um estímulo luminoso cuja luminância ou repartição espectral flutua no tempo.

A diferença entre uma flutuação de tensão e um *flicker* é o facto de um determinado sinal de tensão, que apresenta uma flutuação, não resulte forçosamente numa tremulação luminosa visível.

Os *flickers* podem ser classificados em quatro tipos, isto é, desde o tipo A ao tipo D. Relativamente aos *flickers* do tipo A, estes apresentam degraus de tensão periódicos e de amplitude constante, cuja origem poderá ser a comutação periódica de cargas resistivas, ou de aparelhos de soldadura. A figura 37 mostra a variação da tensão realizada por um *flicker* do tipo A.

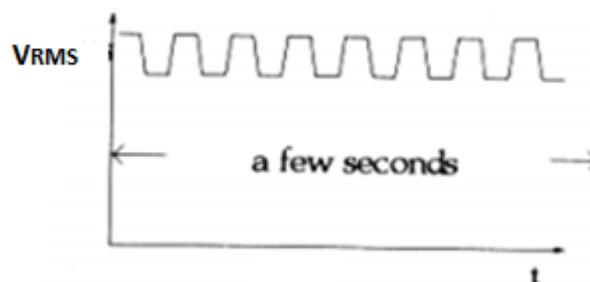


Figura 37 – Variação da tensão provocada por *flicker* do tipo A

No que diz respeito à ocorrência de *flickers* do tipo *B*, a variação da tensão apresenta uma série de degraus irregulares com amplitudes máximas e mínimas iguais ou não, como podemos observar na figura 38.

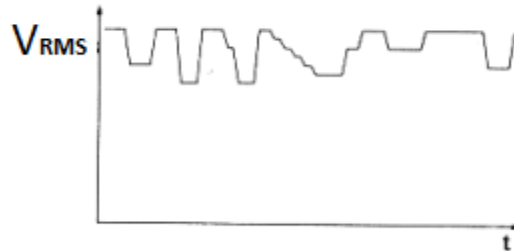


Figura 38 – Variação da tensão provocada por *flicker* do tipo B.

Os *flickers* do tipo *C* apresentam flutuações de tensão bem separadas, cuja origem pode estar na ligação de cargas não resistivas, como por exemplo motores eléctricos. A figura 39 apresenta a variação da tensão provocada por um *flicker* do tipo C.

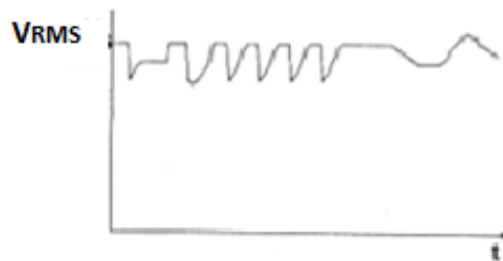


Figura 39 – Variação da tensão provocada por *flicker* do tipo C.

Por último os *flickers* do tipo *D* apresentam flutuações aleatórias contínuas cuja origem são cargas que apresentam variações rápidas nas suas condições de funcionamento, como por exemplo os fornos de arco. A figura 40 mostra um exemplo da variação da tensão provocada pelas condições anteriormente mencionadas.

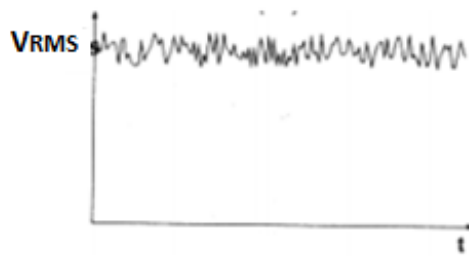


Figura 40 – Variação da tensão provocada por *flicker* do tipo D.

### ***Origem das flutuações de tensão***

As flutuações de tensão são provocadas por cargas de grande potência, e com regimes de funcionamento instáveis. Alguns equipamentos que podem dar origem a flutuações de grande ou pequena amplitude, são os fornos de arco, aparelhos de soldar e outros equipamentos como máquinas de raios-X, fotocopiadoras, impressoras laser de grande capacidade, bombas de calor, fornos, microondas, máquinas de lavar e secar roupa e termoacumuladores.

Os fornos de arco utilizam a energia fornecida para aquecer matérias a alta temperatura existindo fornos de arco AC e DC. Os fornos alimentados a DC podem controlar o arco de uma melhor forma e reduzir o efeito de *flicker*, mas introduzem mais harmónicos na rede devido ao rectificador. Como o arco é altamente instável este tipo de equipamento introduz na rede muitas perturbações, como por exemplo variações significativas na tensão nas redes T&D (EDP, 2005).

### ***Consequências das flutuações de tensão***

As principais consequências nos sistemas eléctricos, resultantes das variações causadas pelos equipamentos de grande potência são a instabilidade da potência e binário das máquinas eléctricas, a queda de rendimento dos equipamentos eléctricos, a interferência nos sistemas de protecção e o efeito *flicker* nas lâmpadas.

### ***Formas de mitigação das flutuações de tensão***

Podem ser implementadas várias estratégias de modo a mitigar a ocorrência das flutuações de tensão. Estas estratégias passam pelo aumento da potência de curto-circuito e pela diminuição da energia reactiva.

Em relação ao *aumento da potência de curto-circuito*, os equipamentos com potência significativa e com regimes de carga instáveis devem ser alimentados através de redes com potência de curto-circuito elevadas. A potência de curto-circuito num determinado ponto da rede eléctrica pode ser aumentada significativamente através da impedância de circuitos de alimentação colocando transformadores, linhas ou subestações em paralelo.

A *diminuição da energia reactiva na rede* é outra medida a ter em conta para a diminuição das flutuações de tensão, já que as variações do fluxo de energia reactiva também provocam flutuações de tensão. Deve ainda ser compensada a energia reactiva junto das cargas emissoras através de compensadores estáticos de energia reactiva, *Static VAR*.

#### **3.1.1.5. Desequilíbrio de tensões**

O *desequilíbrio de tensões* caracteriza-se pela variação das tensões de um sistema trifásico de modo a que as amplitudes das tensões de fase e/ou os desfasamentos entre elas não sejam iguais, tal como indicam os gráficos da figura 41.

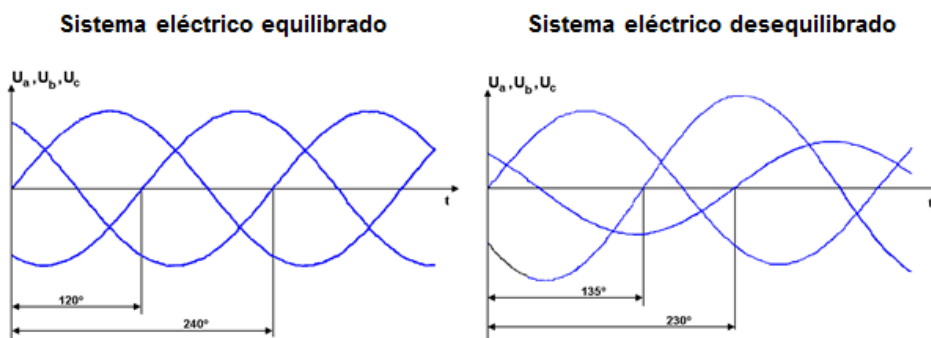


Figura 41 – Sistema eléctrico equilibrado e sistema eléctrico desequilibrado entre tensões (EDP Distribuição, 2007).

As normas de energia IEC 61000-4-3 e EN 50160 definem um desequilíbrio de tensões do seguinte modo:

“Estado no qual os valores eficazes das tensões das fases ou das defasagens entre tensões de fases consecutivas, num sistema trifásico, não são iguais.” (IEC, 2003).

A quantificação de um desequilíbrio entre tensões é feita através da decomposição das três componentes simétricas de um sistema trifásico. Para melhor entendermos esta quantificação podemos analisar a figura 42, que ilustra a decomposição das três componentes de um sistema trifásico desequilibrado em tensões simétricas.

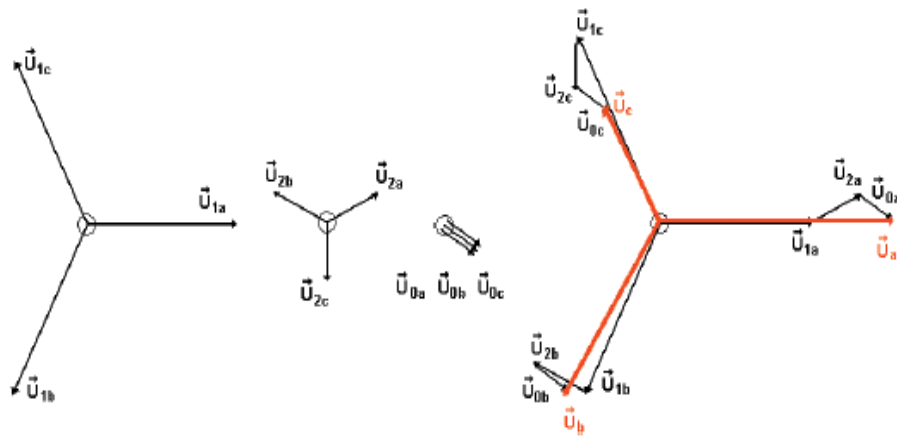


Figura 42 – Decomposição de um sistema trifásico desequilibrado, em tensões simétricas.

Um sistema trifásico pode ser decomposto em três componentes, que são:

- Componente directa.
- Componente inversa.
- Componente homopolar.

A *componente directa* ( $U_{1a}$ ,  $U_{1b}$ ) corresponde a um sistema trifásico ideal. Por sua vez, a *componente inversa* ( $U_{2a}$ ,  $U_{2b}$ ,  $U_{2c}$ ) corresponde a um sistema trifásico equilibrado com sequência de fases inversa ao sistema de sequência directa. Por último, a *componente homopolar* apresenta todas as tensões com a mesma fase ( $U_{0a}$ ,  $U_{0b}$ ,  $U_{0c}$ ).

Cada tensão do sistema trifásico corresponde assim à soma vectorial das componentes referidas.

O desequilíbrio entre tensões é obtido pela razão entre a componente inversa e a componente directa.

### ***Origem de desequilíbrios de tensões***

Os sistemas trifásicos de tensões gerados pelas máquinas síncronas, nas centrais produtoras de electricidade, apresentam um equilíbrio praticamente perfeito. Mesmo os sistemas trifásicos de tensões gerados por máquinas assíncronas podem ser considerados equilibrados (Driesen, et al., 2002).

Presentemente, existem pequenas unidades de geração distribuída ligadas aos sistemas de distribuição, sendo algumas destas ligadas directamente em Baixa Tensão (BT). Uma vez que estes pontos de ligação apresentam impedâncias relativamente elevadas, podem surgir desequilíbrios de tensão significativos (Driesen, et al., 2002). Existem um conjunto muito alargado de causas que contribuem para a origem de desequilíbrio dos sistemas trifásicos de tensões, sendo a maior causa a distribuição assimétrica de cargas pelas fases. Esta distribuição dá origem a sistemas de correntes desequilibrados que, por sua vez, provocam quedas de tensão diferentes nas três fases e o desequilíbrio dos sistemas de tensões.

### ***Consequências dos desequilíbrios de tensões***

O desequilíbrio de tensões afecta essencialmente o desempenho dos equipamentos trifásicos, nomeadamente os motores de indução e os transformadores.

Relativamente aos *motores de indução*, o desequilíbrio de tensões provoca o aumento de perdas internas e posterior redução do rendimento, a elevação de temperatura de operação reduz o tempo de vida útil e diminui o factor de potência.

Na maioria dos *transformadores*, a componente inversa é transformada do mesmo modo que a componente directa, sendo que a única diferença reside no desfasamento provocado pelos transformadores com ligações estrela-triângulo ou triângulo-estrela. O comportamento de um transformador face à componente homopolar depende da ligação dos enrolamentos e da existência, ou não, de condutor de neutro. Assim, no caso dos enrolamentos do primário ou do secundário estarem ligados em estrela, com neutro, é possível a circulação de correntes homopolares. No caso dos enrolamentos estarem ligados em triângulo, a circulação de correntes homopolares no triângulo provoca o sobreaquecimento dos enrolamentos, e o fluxo magnético homopolar, ao circular na

estrutura do transformador, dá origem a perdas de energia. Deste modo, os transformadores devem ser dimensionados tendo em consideração as correntes com componentes inversa e homopolar significativa.

### ***Mitigação dos desequilíbrios de tensões***

As formas de diminuir o desequilíbrio de tensões nos sistemas trifásicos consistem em adoptar medidas de precaução, tais como:

- Redistribuição de cargas
- Aumento da potência de curto-circuito
- Transformadores com ligações especiais.

A *redistribuição de cargas* é feita pelas três fases e pode ser suficiente para minimizar o desequilíbrio de correntes e o conseqüente desequilíbrio de tensões, em circuitos com desequilíbrios de correntes significativos.

O desequilíbrio de tensões num determinado ponto é inversamente proporcional à potência de curto-circuito nesse ponto. Assim, as cargas que provocam maior desequilíbrio devem ser alimentadas em níveis de tensão com *potência de curto-circuito superior* (MT ou AT).

A utilização de *transformadores com ligações especiais* permite a minimização do impacto da corrente absorvida por cargas monofásicas, como por exemplo os transformadores de *Scott* e de *Steinmetz*. O primeiro consiste na associação de dois transformadores monofásicos, com razões de transformação especiais, de modo a garantirem um sistema bifásico, com tensões desfasadas 90°, permitindo assim a ligação de cargas bifásicas ou monofásicas. Se a carga bifásica ou a distribuição de cargas monofásicas forem equilibradas, esta ligação comporta-se, perante a rede, como uma carga trifásica equilibrada (Baptista, et al., 2008). Na figura 43 encontra-se ilustrado o esquema de conexão de um transformador *Scott*.

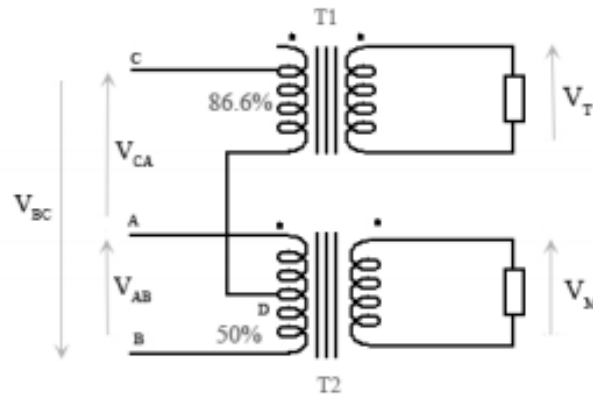


Figura 43 – Esquema de conexão de um transformador *Scott*.

No que diz respeito ao transformador de *Steinmetz*, este é constituído por um transformador trifásico associado a uma carga reactiva, dimensionada em função da carga monofásica a alimentar. Quando a potência reactiva associada ao transformador for igual à potência activa da carga monofásica dividida por  $\sqrt{3}$ , o sistema comporta-se com uma carga equilibrada e a potência nominal trifásica do transformador iguala a potência activa da carga monofásica. A figura 44 mostra um transformador de *Steinmetz* a alimentar um sistema de tracção monofásico.

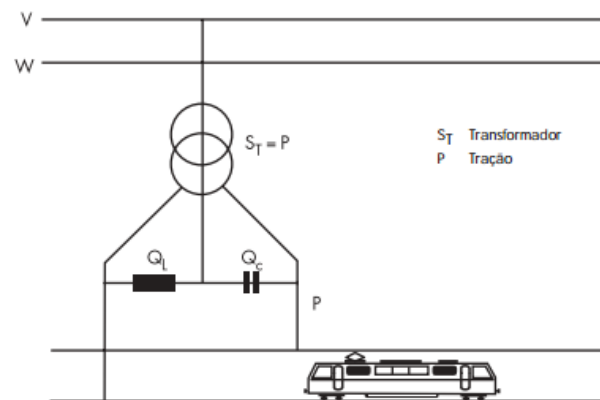


Figura 44 – Transformador de *Steinmetz* a alimentar um sistema de tracção monofásico(EDP, 2005).

### 3.1.1.6. Distorção harmónica

Entende-se por harmónicos as tensões ou correntes com frequências múltiplas inteiras da componente fundamental, 50 Hz, que se classificam quanto à ordem, frequência e sequência.

A ordem de um harmónico está relacionada com o múltiplo da frequência fundamental, se um harmónico tem ordem quatro este apresenta uma frequência quatro vezes superior à frequência fundamental ( $f_0$ ). No caso de  $f_0 = 50\text{Hz}$ , então o quarto harmónico será de 200 Hz. Para melhor compreendermos o relacionamento entre a ordem do harmónico e a frequência fundamental podemos observar a tabela 7 que contém a classificação de harmónicos.

Tabela 7 – Classificação dos harmónicos (EDP, 2005).

<i>Ordem Fundamental</i>	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	...	n
<i>f (Hz)</i>	50	100	150	200	250	300	350	400	$n \times 50$

A distorção harmónica de uma forma de onda quantifica a respectiva deformação ao longo de cada ciclo da frequência fundamental. A figura 45 ilustra a onda de tensão com uma distorção harmónica.

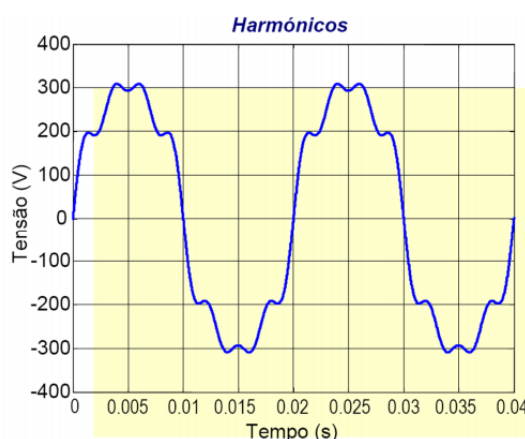


Figura 45 – Distorção harmónica numa onda de tensão(EDP, 2005).

A quantificação da distorção harmónica tem associado o conceito de taxa de distorção harmónica, *Total Harmonic Distortion* (THD). Esta calcula-se através do quociente entre o valor eficaz das componentes harmónicas e o valor eficaz total do sinal, conforme se mostra a equação 1.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} S_{n(RMS)}^2}}{S_{RMS}} \times 100 = \frac{\sqrt{S_{2(RMS)}^2 + S_{3(RMS)}^2 + \dots + S_{n(RMS)}^2}}{S_{1(RMS)}} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

### *Origem de uma distorção harmónica*

Na origem de uma distorção harmónica deve considerar-se o tipo da carga que está a ser utilizada. No caso da utilização de cargas lineares, a corrente absorvida é proporcional à tensão de alimentação, apresentando também uma tensão sinusoidal, o que não provoca uma distorção harmónica. Por sua vez, as cargas não lineares são caracterizadas por não apresentarem uma impedância constante com a variação de tensão, logo a corrente absorvida não é proporcional à tensão o que provoca a uma onda não sinusoidal. A figura 46 mostra a distorção harmónica da tensão provocada pela utilização de cargas não lineares.

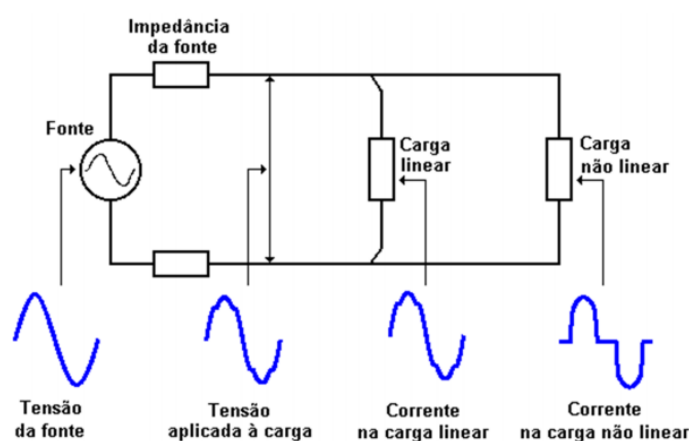


Figura 46 – Distorção harmónica da tensão provocada por correntes harmónicas (Oliveira, 2012).

A utilização de cargas não lineares, que absorvem correntes harmónicas e de componentes que compõem as redes eléctricas que contêm uma impedância não desprezável, provocam quedas de tensão que conduzem à distorção harmónica da tensão.

As fontes de alimentação de equipamentos electrónicos, lâmpadas de descarga e transformadores em regime de saturação, são exemplos de cargas não lineares que podem originar uma distorção harmónica. Repare-se que no mundo actual tem-se um número crescente de cargas não lineares e conseqüentemente a distorção harmónica.

### ***Consequências de uma distorção harmónica***

O grau de severidade de uma distorção harmónica depende do tipo de equipamento e das características da rede em que ele se encontra. Uma distorção harmónica apresenta-se através do aumento do valor eficaz da corrente ou através da deformação da forma de onda de tensão ou corrente. Este aumento do valor eficaz traduz-se num aumento da temperatura dos componentes eléctricos o que reflecte posteriormente na degradação do isolamento e num rendimento mais baixo. Ao aumento do valor eficaz da corrente está associada uma subida de temperatura dos componentes eléctricos que se traduz em degradação de isolamento diminuição de rendimento e num mau funcionamento dos sistemas de protecção.

### ***Mitigação de uma distorção harmónica***

Para que as distorções harmónicas sejam minimizadas, existem um conjunto de hipóteses que podem ser implementadas, podendo ser ao nível do *sobredimensionamento de equipamentos, separação de cargas* e utilização de *filtros de harmónicos*.

Em relação ao *sobredimensionamento de equipamentos*, a principal efeito conseqüente de uma distorção harmónica é o aumento de perdas por dissipação térmica. Este efeito pode ser mitigado com a redução da carga ou do sobredimensionamento do equipamento que foi sujeito às perdas por dissipação térmica.

Para minimizar o efeito da distorção harmónica em cargas mais sensíveis são adoptados circuitos de alimentação diferentes para as cargas lineares e para as cargas não lineares.

A utilização de *filtros de harmónicos* tem como objectivo reduzir a amplitude de tensões e correntes de uma ou mais frequências harmónicas.

### **3.2. Normas associadas à qualidade de energia eléctrica**

A QEE tem apresentado um crescente interesse devido ao seu grande impacto na competitividade das empresas. Deste modo, é necessário o esclarecimento de todas as partes interessadas no sector eléctrico, através das *entidades governamentais e da regulação* de modo transversal, desde o produtor até ao consumidor.

Os objectivos da regulação passam por assegurar a competência do uso de um produto, processo ou serviço, permitir que os produtos, serviços ou projectos sejam utilizados de modo a satisfazerem as exigências do consumidor, a protecção da vida humana e a saúde e a protecção do ambiente.

De acordo com a norma portuguesa de energia NP 45020: 2001, a *normalização* permite determinar um conjunto de regras com vista a obter o bom funcionamento de um processo, satisfazendo as exigências do consumidor e protegendo os interesses de todas as partes interessadas.

*“A Normalização é a actividade destinada a estabelecer, face a problemas reais ou potenciais, disposições para utilização comum e repetida, tendo em vista a obtenção do grau óptimo de ordem, num determinado contexto. Consiste, em particular, na elaboração, publicação e promoção do emprego das normas”* (CENELEC, 2001).

A utilização de normas permite assim a comunicação entre todas as partes interessadas, simplificando a coordenação e organização de processos. Isto só é possível através da participação de entidades reguladoras, que formalizam e concretizam a normalização de meios de apoio ao cumprimento das normas, podendo estes meios ser técnicos, humanos e outros meios que sejam necessário à sua execução.

Na figura 47, podemos verificar a parâmetros associados à normalização, nomeadamente as entidades reguladoras, as normas a ser implementadas e os meios para o seu cumprimento.

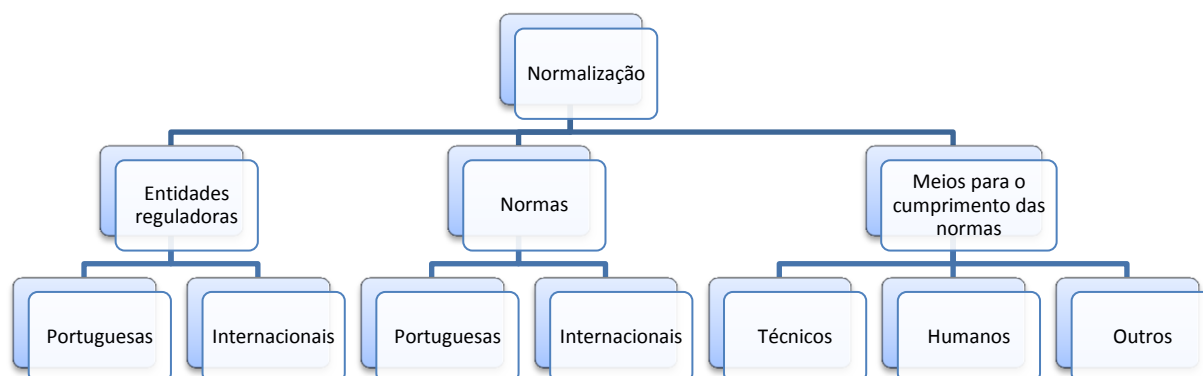


Figura 47 – Parâmetros utilizados na concretização de uma normalização.

Nos subcapítulos seguintes serão apresentados todos os parâmetros relacionados com a normalização da QEE, as entidades reguladoras, portuguesas e internacionais, as normas relacionadas com a implementação deste trabalho e os meios de cumprimento das normas.

### 3.2.1. Entidades reguladoras

As *entidades reguladoras* são organizações com o objectivo prestar auxílio, a uma determinada actividade de um sector, acompanhando a implementação das regras impostas por si ou por entidades governamentais. Algumas dessas estruturas têm também funções de fiscalização do mercado e do respectivo modo de funcionamento. O desenvolvimento das funções de regulação realizadas pelas entidades reguladoras permite a obtenção benefícios aos consumidores e a sua integração no funcionamento e estratégia adoptadas pelas entidades reguladoras.

No contexto deste trabalho serão apresentadas, nos subcapítulos seguinte, as entidades reguladoras portuguesas e internacionais, responsáveis pelas normas inerentes à QEE. Nomeadamente, a *International Electrotechnical Commission* (IEC), o Comité Europeu de Normalização Electrotécnica (CENELEC), o Sistema Eléctrico Nacional (SEN) e a Entidade Reguladora de Serviços Energéticos (ERSE). A figura 48 mostra as entidades reguladoras e o modo como prestam apoio à normalização associada à QEE.

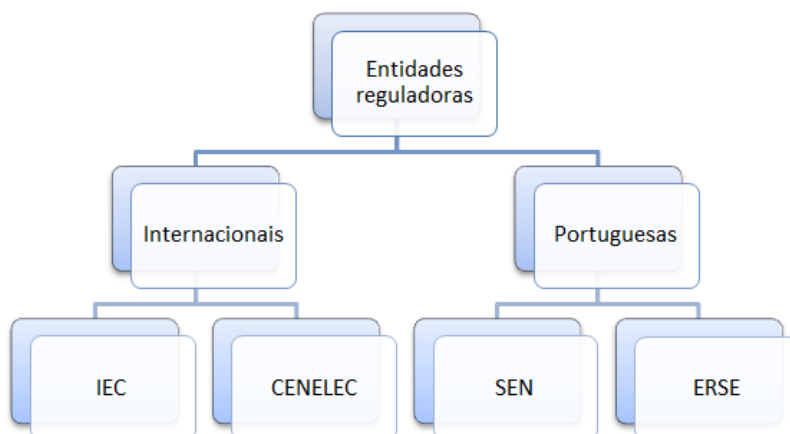


Figura 48 – Entidades reguladoras internacionais e portuguesas associadas à normalização da QEE.

De seguida serão apresentadas as entidades associadas às normas de QEE.

### 3.2.1.1. Entidades internacionais

Decorria a década de 1960, quando foi criada a Comunidade Europeia (CE) com o objectivo de estabelecer uma zona de comércio livre na Europa. Para que este objectivo fosse concretizado, existiu a necessidade de realizar um conjunto de normas e técnicas para que essa zona de comércio livre apresentasse um bom funcionamento. Assim, como resultado das necessidades impostas para a criação da regulação da zona de comércio livre europeia, foi criada uma comissão europeia responsável pela concretização dessas regras, a CENELEC, que apresenta as suas regras com base nas normas internacionais da IEC.

As entidades internacionais colaboram entre si de modo, a obter resultados de maior relevância junto do consumidor e que os padrões estipulados sejam cumpridos tendo em conta os interesses de todas as partes envolvidas.

#### *International Electrotechnical Commission*

A comissão internacional IEC tem o intuito de auxiliar entidades que utilizem os padrões por elas estipulados, sendo constituída por membros provenientes de todo o mundo e que têm em comum os interesses electrotécnicos dos respectivos países. A sua fundação

realizou-se a 15 de Setembro de 1904, após a aprovação de um relatório pelos delegados do Congresso Internacional Eléctrico, realizado em *St. Louis*, nos Estados Unidos da América (EUA). Este relatório referencia que deveriam ser tomadas medidas de modo a garantir a cooperação das entidades técnicas de todo o mundo, de modo a concretizarem modelos de classificação e terminologia de aparelhos e máquinas eléctricas.

Esse acordo refere explicitamente:

*"...steps should be taken to secure the co-operation of the technical societies of the world, by the appointment of a representative Commission to consider the question of the standardization of the nomenclature and ratings of electrical apparatus and machinery."*  
(IEC, 2013)

Como resultado da aprovação desse relatório pelos delegados do Congresso Internacional Eléctrico, a IEC foi fundada oficialmente em Junho de 1906.

No ano de 1914, a IEC formou quatro comissões técnicas com finalidade de abordarem nomenclaturas, símbolos e avaliações de máquinas eléctricas e motores principais. Desta abordagem, surgiu a divulgação de uma primeira lista sobre termos e definições sobre máquinas e aparelhos eléctricos, uma lista de símbolos ou letras para unidades eléctricas, um modelo internacional para a resistências ao cobre, uma lista de definições em relação a turbinas hidráulicas e um conjunto de definições e recomendações relativas a máquinas rotativas e transformadores.

Durante a primeira guerra mundial a IEC interrompeu a sua actividade, retomando-a novamente no ano de 1919.

No ano de 1923 o número de entidades técnicas aumentou para dez e a IEC decidiu criar o comité de acção "*Committee of Action*" com o propósito de auxiliar as decisões do conselho e coordenar o trabalho das comissões nacionais. Em 1938, a IEC produziu a primeira edição do vocabulário internacional electrotécnico (*International Electrotechnical Vocabulary* (IEV)), que posteriormente foi disponibilizado gratuitamente para o público geral. A junção de todas as terminologias electrotécnicas, foi realizada pelo comité de nomenclaturas, *Nomenclature Committee*, sendo constituído por 2000 termos em francês,

inglês, alemão, italiano, espanhol e esperanto<sup>2</sup> e definições em francês e inglês. Todo este trabalho foi pioneiro, pois nenhum vocabulário internacional técnico semelhante tinha, até então, sido publicado e apenas alguns vocabulários nacionais electrotécnicos existiam. Durante a segunda guerra mundial, a IEC interrompeu de novo a sua actividade, retomando-a após seis anos.

As normas que abrangem as medições, requisitos de segurança e de testes e especificação de componentes para receptores de rádio e televisão começaram a aparecer no ano de 1939, iniciando-se trabalhos no âmbito da electroacústica. Neste âmbito, é criada o *International Special Committee on Radio Interference* (CISPR) com o objectivo de desenvolver padrões ao nível dos limite permissíveis para várias faixas de frequência utilizadas na transmissão de rádio e métodos a utilizar na interferência em medições.

Entre os anos de 1948 a 1980, o número de comissões técnicas cresceu de 34 a 80 e as áreas de estudo aumentaram incluindo condensadores, resistências, semicondutores, equipamentos eléctricos usados na prática de medicina e na navegação marítima e equipamentos de comunicações via rádio. Em 1974, o IEC criou o comité técnico, *Technical Committee 76*, para abordar as normas relativas ao uso de lasers, tendo um foco especial na segurança (IEC, 2013).

Com o desenvolvimento tecnológico a IEC tentou dar continuidade ao seu trabalho no desenvolvimento de padrões e normas que abordassem todas as áreas de desenvolvimento.

O desenvolvimento das normas IEC são essenciais para entidades que utilizem os padrões por elas estipulados. Estas entidades podem ser, indústrias (quer ao nível da empresa ou associados a ela), clientes (nacionais, regionais ou internacionais), universidades, organizações e laboratórios de investigação, organizações governamentais e entidades reguladoras.

Os membros da IEC estão distribuídos por todo o mundo e têm em comum os interesses electrotécnicos do seu país. Assim, esta comissão, compõe uma série de publicações

---

<sup>2</sup> **Esperanto**- língua criada por *Ludwig Lazarus Zamenhof*, no final da década de 70 e início da década de 80, com o objectivo de realizar um idioma fácil de aprender de modo a promover a compreensão entre as pessoas com diferentes línguas regionais e/ou nacionais.



(CENEL), deu origem à formação da *CENELEC*. Após a sua formação, o CENELEC procurou evidenciar o acesso ao mercado a nível europeu e internacional, adoptando padrões internacionais, através da colaboração com a IEC, no âmbito do Acordo Dresden<sup>3</sup>. A interacção entre a IEC e o CENELEC, levou a realização de normas europeias, do sector electrotécnico, designadas como *European Norms* (EN) tendo com base nas normas IEC. A figura 50 mostra a denominação de uma EN de acordo com o número da norma e a data em que é realizada.

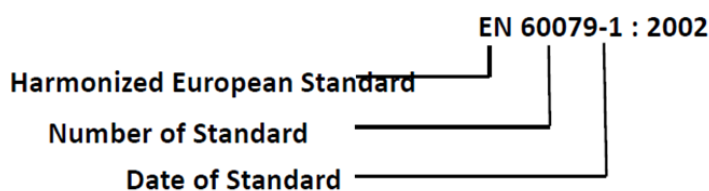


Figura 50 – Denominação de uma norma EN.

Os objectivos da CENELEC passam por satisfazer as necessidades das indústrias europeias e todas as partes interessadas, dando apoio à comissão internacional IEC no âmbito do cumprimento da sua missão.

### 3.2.1.2. Entidades Portuguesas

O sistema eléctrico em Portugal desenvolveu-se a partir de sistemas hidroeléctricos, constituídos por pequenas unidades termoeléctricas, que forneciam energia a indústrias locais, a consumidores domésticos e iluminação pública. Mais tarde, o estado português estabeleceu a importância do desenvolvimento das centrais hidroeléctricas, a promoção do consumo de electricidade e a participação conjunta do estado e de entidades privadas relativamente a investimentos.

O fornecimento de energia pressupõe a aceitação, entre as partes envolvidas, de um conjunto de regras contratuais que estabelecem, entre outros, um conjunto de parâmetros

---

<sup>3</sup> Acordo Dresden – acordo entre o CENELEC e a IEC, a nível do planeamento comum de um novo trabalho e votação paralela da normalização.

associados à electricidade fornecida. Numa primeira fase, a definição dos parâmetros foi feita com base em regras nacionais, através das entidades reguladoras nacionais, o SEN e a ERSE. No entanto, a interligação com os mercados de electricidade internacionais levou à necessidade da utilização de uma legislação mais abrangente, com regras e padrões de qualidade genericamente aceites e comuns nos mercados de electricidade internacionais. As entidades reguladoras nacionais têm assim como objectivo difundir os interesses dos consumidores e fomentar o equilíbrio da relação entre as entidades envolvidas no sector eléctrico, através de regras ou padrões aceites e implementadas por estas entidades.

### *Sistema Eléctrico Nacional*

Após o 25 de Abril de 1974 ocorreu a nacionalização do sector eléctrico e, consequentemente a criação de empresas públicas, com o objectivo de integrar o exercício das actividades de produção, transporte e distribuição de energia eléctrica. Esta nacionalização deu origem às empresas Energias de Portugal (EDP), a Energia dos Açores (EDA) e a Empresa de Electricidade da Madeira (EEM). Com a aplicação dos princípios da directiva 96/92/CE, de 19 de Dezembro, do ano de 1995, estabeleceram-se padrões com o intuito liberalizar o sector e criar um mercado interno de electricidade, assegurando a liberdade de acesso às actividades de produção e distribuição de energia. O acesso a estas actividades foi possível através da definição de um sistema com base no exercício das actividades de produção, transporte e distribuição de energia eléctrica, o SEN.

O SEN é constituído pelo Sistema Eléctrico de Serviço Público (SEP) ou sistema vinculado e pelo Sistema Eléctrico Independente (SEI) e é responsável por garantir o provisionamento de electricidade a qualquer consumidor que assim o pretenda. A figura 51 mostra a organização do SEN português.

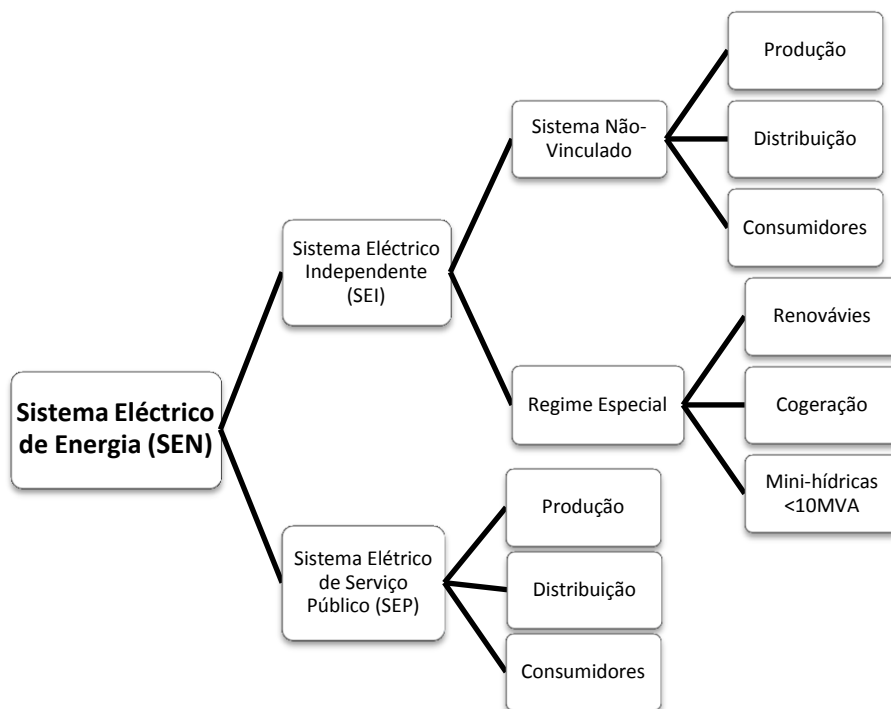


Figura 51 – Organização do SEN (Caçote, 2012).

O *SEP* tem como objectivo a prestação de um serviço público, com o intuito de assegurar uma adequada oferta de energia, no âmbito das obrigações de serviço público do SEP, que passam por promover o bem-estar da população. O SEP, de acordo com o seu objectivo, actua nas áreas da produção de electricidade, distribuição e consumo final.

O *SEI* apresenta uma organização salientada numa lógica comercial, com o objectivo de satisfazer as necessidades de consumo do produtor ou de consumidores finais de energia. Este sistema eléctrico abrange áreas de produção de energia específicas, as mini-hídricas, energias renováveis e a cogeração, que se regem por um regime especial e condições de mercado, em que o acesso à rede para clientes não vinculados está sujeito a tarifas específicas, as tarifas reguladas (Sistema Eléctrico Não Vinculado (SENV)).

Todas as actividades realizadas pelo SEN devem ser realizadas tendo em conta a eficiência na utilização de recursos desde a produção até ao consumo final de electricidade.

## *Entidade Reguladora de Serviços Energéticos*

A criação da Entidade Reguladora do Sector Eléctrico, no ano de 1995, deu mais tarde origem à ERSE a entidade que é responsável pela regulação dos sectores do gás natural e de electricidade em Portugal. Após a sua concretização, a ERSE publicou um conjunto de regulamentos, nomeadamente o Regulamento Tarifário, que passaram a enquadrar o funcionamento do sector nos anos seguintes. No ano de 2000 é publicado o Regulamento de Qualidade de Serviço (RQS), sendo revisto e actualizado em Março de 2006, encontrando-se actualmente em vigor.

Formalmente a ERSE assume-se do seguinte modo:

*“A ERSE é uma pessoa colectiva de direito público, dotada de autonomia administrativa e financeira e de património próprio, regendo-se pelos seus Estatutos aprovados pelo Decreto-Lei n.º 97/2002, de 12 de Abril, alterados pelo Decreto-Lei n.º 212/2012, de 25 de Setembro, na redacção do Decreto-Lei n.º 84/2013, de 25 de Junho.” (ERSE, 2009)*

A regulação realizada pela ERSE tem como objectivo zelar pelos interesses dos consumidores ao nível do consumo energético, relativamente a preços, qualidade de serviço, acesso à informação e segurança de abastecimento bem assim como promover a concorrência entre os agentes intervenientes nos mercados. Para levar a cargo a sua missão, esta recebe da lei e dos seus regimes um conjunto de jurisdições, que se podem resumir da seguinte forma:

- A protecção dos direitos e os interesses dos consumidores.
- Garantir coerência económica.
- Garantir o cumprimento das obrigações de serviço público e das obrigações estabelecidas pela lei.

O primeiro conjunto de jurisdição é relativo a preços, à forma e qualidade da prestação serviços, promovendo a sua informação, esclarecimento e formação, sendo aplicado em particular a clientes economicamente vulneráveis.

A *garantia da coerência económica e financeira* é realizada através de condições que permitam obter um equilíbrio económico e financeiro nas actividades dos sectores regulados exercidos em regime de serviço público.

Por ultimo o *cumprimento das obrigações do serviço público e das obrigações estabelecidas pela lei*, visa zelar pelo cumprimento de todas as regulações impostas, por parte dos agentes do sector.

Deste modo, a ERSE enquanto entidade regulatória, deve constituir uma ferramenta capaz de fomentar a eficiência e conformidade nas actividades dos sectores de gás natural e electricidade, relativamente a objectivos claros e não discriminatórios, através de uma supervisão e acompanhamento contínuos das actividades dos consumidores.

Posteriormente serão expostas as normas de energia utilizadas na realização deste trabalho.

### **3.2.2. Normas de energia**

As normas de energia usam, entre outras formas de comunicação, a linguagem não-verbal ou semi-verbal e desta forma, a sua terminologia assume-se como uma tarefa fundamental em toda a sua actividade. O facto de uma norma ser publicada em vários idiomas é da maior importância na compreensão de textos e das terminologias e definições nela inserida.

No contexto a elaboração deste trabalho, serão expostos dois grupos de normas:

- Normas nacionais (RQS e EN 50160).
- Normas internacionais (IEC 61000-4-3, IEC 61000-4-7).

A figura 52 mostra quais as normas nacionais e internacionais que vão ser expostas de seguida.

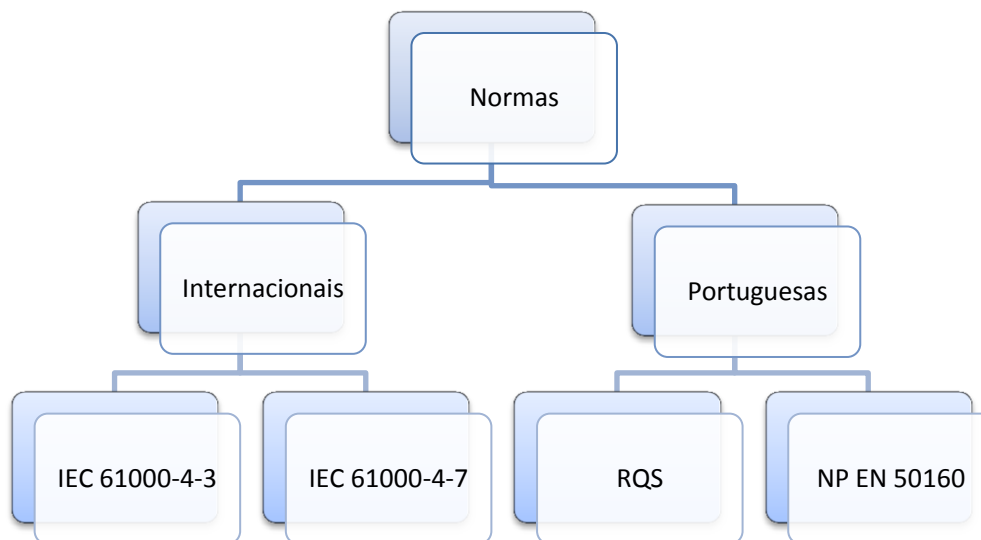


Figura 52 – Normalização da QEE, internacionais e portuguesas.

### 3.2.2.1. Normas portuguesas

As normas nacionais são normas técnicas estabelecidas por organismos nacionais, ou que adoptem normas europeias, no âmbito da energia eléctrica. Associadas à implementação deste trabalho, estão o RQS, aplicado pela ERSE e a norma NP 50160, adoptada de uma norma europeia realizada pelo CENELEC.

#### *Regulamento de Qualidade de serviço*

O RQS tem um objectivo de estabelecer um plano de qualidade, através da monitorização, para os serviços de abastecimento de energia eléctrica prestados pelas entidades do SEN, relativamente aos seguintes aspectos:

- Continuidade de serviço.
- Qualidade de onda de tensão.
- Qualidade de serviço comercial.

No que respeita à *continuidade de serviço*, esta pretende caracterizar a fornecimento adequado de energia através do número e duração das interrupções do fornecimento. Para além dos indicadores gerais aplicados às redes de transporte e de distribuição, o RQS

determina padrões de continuidade de serviço, cujo incumprimento resulta no pagamento de coimas por parte dos operadores das redes em causa.

A *qualidade da onda tensão* é caracterizada através dos parâmetros directamente associadas tais como a amplitude, a frequência, a forma da onda e a simetria do sistema trifásico da tensão.

Por último, a *qualidade de serviço* comercial, fornecida aos clientes pelas empresas distribuidoras, quer sejam operadores de rede ou comercializadores, inclui factores tais a rapidez de atendimento, a resposta a diversos pedidos, a leitura de contadores ou a avaliação da satisfação dos clientes.

A regulação de todos estes aspectos é realizada com o auxílio de indicadores e padrões, estabelecidos no RQS e avaliados periodicamente pela ERSE. O Decreto-Lei nº48, de 8 de Março de 2006, define o RQS como,

*“O presente Regulamento estabelece os padrões mínimos de qualidade, de natureza técnica e comercial, a que deve obedecer o serviço prestado pelas entidades do Sistema Eléctrico Nacional (SEN) de Portugal continental.”* (Diário da República, 2006)

De acordo com o Artigo 2º, patente no RQS, estão abrangidas pelas disposições deste regulamento, os operadores da rede de transporte, os operadores das redes de distribuição, os comercializadores de último recurso e os comercializadores regulados, os comercializadores, os agentes externos, os clientes e os produtores com instalações ligadas à rede de transporte e às redes de distribuição.

Os padrões acessíveis neste regulamento definem os níveis de serviço para o número e duração de interrupções de fornecimento, as características técnicas da tensão, o atendimento telefónico e presencial, a resposta a reclamações e pedidos de informação, a leitura de equipamentos de medição, prazos de religação do fornecimento, o horário de visitas técnicas e o prazo para execução de orçamentos e ramais de ligação à rede.

Assim, tendo em vista estes aspectos, os modelos de qualidade de serviço variam com as zonas geográficas. A tabela 8 mostra a classificação das zonas de implementação dos padrões de qualidade de serviço de acordo com o RQS.

Tabela 8 – Classificação das zonas de implementação dos padrões de qualidade de serviço, de acordo com o RQS (ERSE, 2009).

Zona A	Capitais de distrito e localidades com mais que 25000 habitantes
Zona B	Localidades com número de clientes compreendidos entre 2500 e 25 0000
Zona C	Restantes locais

É da responsabilidade das entidades do SEN, implementar os respectivos sistemas de registo e monitorização, apresentando posteriormente um plano anual de monitorização e o atendimento de reclamações do cliente, independentemente de qualquer que seja a origem do problema. De acordo com os padrões definidos pelo RQS, a violação de padrões individuais da continuidade de serviço ou da qualidade comercial, desde que não resultando de situações fortuitas ou de força maior, de razões de interesse público, de razões de serviço, de razões de segurança, ou de facto imputável ao cliente ou por acordo com este, dá direito ao cliente a uma receber uma compensação, paga de forma automática, nos prazos estabelecidos, sem carecer de reclamação.

O RQS encontra-se actualmente revisto e em vigor desde 8 de Março de 2005, através do Despacho n.º 5255/2006 (Diário da República, 2006).

### ***NP 50160***

A norma portuguesa, NP 50160 de 2001, certificada pelo CENELEC, define as características de tensão fornecidas pelas redes de distribuição pública de energia eléctrica, incluindo a descrição das particularidades, no ponto de entrega ao cliente, da tensão de alimentação por uma rede de distribuição pública BT ou MT, em condições de exploração normais. (CENELEC, 2001).

Relativamente aos níveis de tensão, a norma NP 50160 define BT como a sendo a tensão utilizada para o fornecimento de energia eléctrica cujo valor eficaz nominal tenha o limite máximo de 1kV, e MT como a tensão utilizada para o fornecimento de energia eléctrica cujo valor eficaz nominal seja superior a 1kV e não superior a 35 kV. Em qualquer dos casos, a frequência injectada na rede deve ser igual a 50 Hz, podendo estar compreendida entre os seguintes intervalos de valores

- +/- 1% durante 99,5% de um ano.
- +4% ou -6% durante 100% do tempo.

A norma portuguesa define ainda os limites ou valores característicos da tensão que um cliente tem direito a esperar, não descrevendo a situação típica de uma ligação a uma rede de distribuição pública. Inclui-se ainda nesta norma, a descrição de grandezas e conceitos referentes não só a perturbações da QEE mas também à produção de energia. Assim, são descritos os conceitos relativos a flutuações de tensão, variações rápidas da tensão, variações da tensão, tremulações, severidade da tremulação, cavas de tensão, interrupções, sobretensões temporárias, sobretensões transitórias, tensões harmónicas e inter-harmónicas e desequilíbrios na tensão.

### **3.2.2.2. Normas internacionais**

As organizações internacionais de normalização utilizam uma participação aberta através da cooperação de todos os organismos de normalização nacionais existentes no mundo. As normas internacionais são normas técnicas estabelecidas por um organismo internacional de normalização para aplicação em âmbito mundiais. Entre as principais normas internacionais vão ser citadas, as normas IEC 61000-4-3 e IEC 61000-4-7.

#### ***IEC 61000***

O conjunto de normas IEC 61000 estabelece padrões relativamente à *Electromagnetic Compability* (EMC), que incluem a terminologia, descrições de fenómenos electromagnéticos, técnicas de medição e testes e orientações sobre instalação e mitigação. Este conjunto de normas está dividido nas seguintes seis partes, IEC 61000-x-x, sendo elas:

- IEC 61000-1-x, generalidades,
- IEC 61000-2-x, ambiente electromagnético.
- IEC 61000-3-x, limites.
- IEC 61000-4-x, técnicas de teste e medida.
- IEC 61000-5-x, linhas de orientação.
- IEC 61000-6-x, diversos.

As normas *IEC 61000-1*, compreendem considerações gerais da QEE, terminologias, definições, etc.

O conjunto de normas *IEC 61000-2* definem as condições electromagnéticas para a instalação do equipamento e o nível de compatibilidade entre o equipamento e o ambiente em que se encontra.

Relativamente aos limites, o conjunto de normas *IEC 61000-3* explicam os limites de perturbações permitidos pelos equipamentos ligados à rede de energia e os limites de imunidade.

As normas *IEC 61000-4* fornecem uma directriz sobre técnicas e métodos para a realização de medidas e avaliação de conformidade entre o equipamento e o ambiente.

O conjunto de normas *IEC 61000-5* fornece linhas de orientação para instalações e mitigação de problemas que abrangem também sugestões acerca da instalação de equipamentos.

Por último, os níveis de imunidade às perturbações electromagnéticas que um equipamento deve possuir, são fornecidos através do conjunto de normas *IEC 61000-5*.

Para a elaboração deste trabalho, salienta-se o uso das normas *IEC 61000-4-3* e *IEC 61000-4-7*. Estas, vão ser abordadas de seguida.

- **IEC 61000-4-30**

A norma *IEC 61000-4-30* define os métodos de medição e interpretação de resultados provenientes da qualidade de energia em redes com frequência igual a 50Hz ou 60 Hz. Os padrões apresentados nesta norma esclarecem métodos de medição e interpretação de alguns parâmetros, nomeadamente, a amplitude da tensão de alimentação, interrupções de tensão, tremulações (*flickers*), cavas de tensão, transitórios de tensões, desequilíbrios de tensão, harmónicos de tensão e corrente, e inter-harmónicos e rápidas mudanças de tensão. Também presentes, neste conjunto de normas estão as classes de desempenho e medição, sendo estas:

- Classe de desempenho e medição A.

- Classe de desempenho e medição B.

A *classe de desempenho A* é usada quando são necessárias medições precisas, utilizando características específicas tais como, largura de banda e taxa de amostragem associadas à incerteza especificada para cada parâmetro.

A *classe de desempenho B* é utilizada em levantamentos estatísticos, resolução de problemas, e outras aplicações em que a incerteza é baixa e não é necessária.

Para cada classe de desempenho existe um conjunto de factores que deverão ser cumpridos. Cabe ao utilizador do equipamento seleccionar a classe de medição de desempenho, tendo em conta a aplicação do equipamento (IEC, 2003).

- **IEC 61000-4-7**

A norma IEC 61000-4-7 contém informação sobre a EMC, relativa a técnicas de teste e medição, medições e instrumentação de harmónicos e inter-harmónicos em sistemas de fornecimento de energia e equipamentos conectados a estes. Define ainda, os métodos de medição destinados a componentes espectrais com frequências acima de 9 kHz, que se sobrepõem à frequência fundamental em sistemas de alimentação com frequência igual a 50 Hz e 60 Hz (IEC).

Neste modelo, estão referenciados os instrumentos de medição destinados a medir grandezas individuais de equipamentos, de acordo com os limites de emissão em certos padrões, bem como os instrumentos para medição de harmónicos de corrente em sistemas de alimentação.

Os padrões de interpretação, relativamente a fenómenos provenientes dos sistemas de abastecimento de energia, sendo estes, harmónicos e inter-harmónicos, são definidos através da transformada de *Discret Fourier Transform* (DFT). Esta produz resultados precisos somente para sinais estacionários sendo que os sinais cuja amplitude varie com o tempo não podem ser correctamente descritos pelas componentes harmónicas.

A norma IEC 61000-4-7 esclarece ainda o novo modelo de instrumentação que determina a utilização de algoritmo rápido chamado *Fast Fourier Transform* (FFT) associada à DFT.

Tal como a norma IEC 61000-4-30, a norma IEC 61000-4-7 define duas classes de precisão e instrumentação, Classe I e Classe II, que permitem a utilização de instrumentos simples e de baixo custo, de acordo com os requisitos da aplicação.

### 3.3. Proposta de modelo de monitorização

O modelo de depuração proposto encontra-se ilustrado na figura 53 e inclui essencialmente dois tipos de operações, as *operações básicas de depuração* e as *operações avançadas de depuração*. As primeiras incluem a *operação de monitorização* e *operação de verificação*. As segundas incluem a *operação de monitorização por condição (watch point)* e a de *monitorização em tempo real (real time monitoring)*.

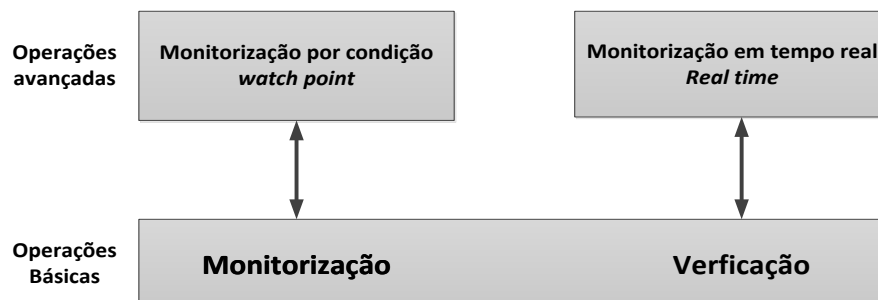


Figura 53 – Modelo de monitorização.



## 4. Proposta da solução

Este capítulo descreve a solução de um *analisador de qualidade de energia* proposta pela empresa Evoleo Technologies. Esta solução envolve o desenvolvimento de *hardware* e de *software* capazes de realizar os objectivos pretendidos. O trabalho consiste em acrescentar funcionalidades ao dispositivo WeSense Energy1 dotando-o de um conjunto de novas potencialidades, transformando-o numa nova versão do equipamento a que chamaremos WeSense Energy2.

O dispositivo WeSense Energy1 é um equipamento fixo capaz de realizar a monitorização de um conjunto de funcionalidades elementares e que são característicos da energia eléctrica. Estas funcionalidades permitem a análise de parâmetros associados à análise energética, tais como a tensão, a corrente e a potência. Os dados adquiridos podem ser visualizados remotamente, permitindo ao utilizador realizar a análise dos dados com vista a propósitos específicos tais como apoiar tarefas de manutenção ou análise de eficiência. Esta última pode ser feita através da análise da assinatura das cargas para individualizar consumos e custos. A figura 54 mostra o diagrama de blocos da proposta de solução apresentada para a concretização do WeSense Energy2.

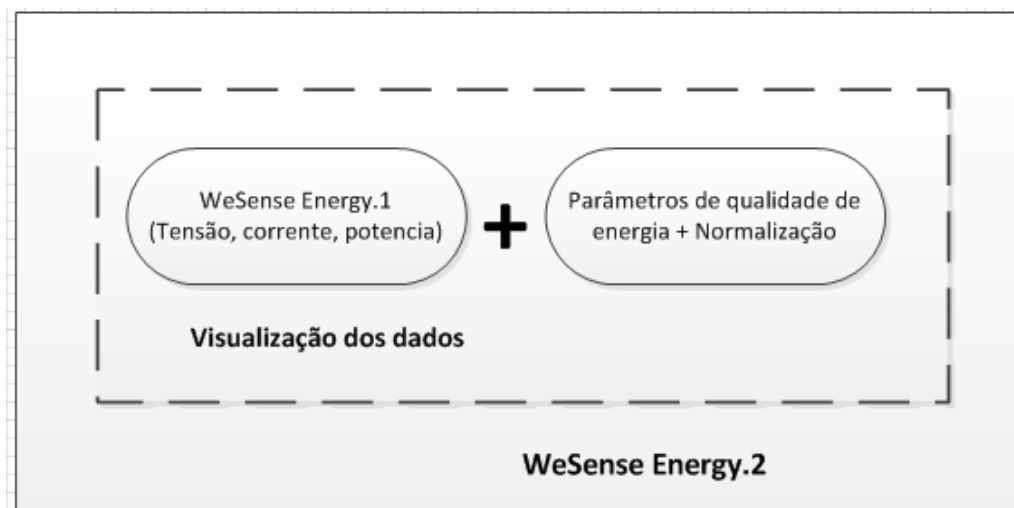


Figura 54 – Diagrama de blocos da proposta de solução apresentada para a concretização do WeSense Energy2.

A concretização do WeSense Energy2 passa por acrescentar funcionalidades ao equipamento existente, explorando mais profundamente as capacidades do CI ADE7880, de modo a monitorizar parâmetros da qualidade de energia. Este novo conjunto de parâmetros, agora mais completo, pode ser visualizado remotamente numa página *web*. Note-se no entanto que estes dados apenas terão validade se cumprirem um conjunto de requisitos estabelecidos normativamente.

No decorrer desta secção será exposto o WeSense Energy1, a definição do projecto WeSense Energy2 e os requisitos estipulados para a sua concretização.

#### 4.1. WeSense Energy1

Como referido anteriormente, o Analisador de Qualidade de Energia (AQEE), WeSense Energy2, desenvolvido neste trabalho tem por base o dispositivo WeSense Energy1, desenvolvido pela equipa da Evoleo Technologies. O WeSense Energy.1 realiza a aquisição de alguns parâmetros elementares relacionados com a energia eléctrica e envia os mesmos, via *ethernet*, para uma página *web* para posterior visualização.

O WeSense Energy1 foi projectado para fazer parte integrante da instalação eléctrica permitindo assim realizar monitorizações em sistemas trifásicos. Através desta

monitorização, o equipamento é capaz de fazer aquisição de dados característicos da energia, tais como tensão, corrente e potência. Os dados são processados e enviados, via *ethernet*, para uma página web onde podem ser visualizadas. O equipamento tem uma autonomia de *backup* de dados até uma hora e o armazenamento de dados até uma semana em caso de falha de comunicação com servidor. O WeSense Energy1 é compacto e robusto e é fornecido numa caixa IP66 para fixação em painel.

As especificações técnicas do WeSense Energy1 encontram-se resumidas na tabela 9.

Tabela 9 – Especificações técnicas do equipamento *WeSense Energy*.

<b>Sistema</b>	Comunicação	<i>Ethernet</i>
	Interfaces do dispositivo	3 entradas de tensão 4 entradas de corrente
	envio de dados para o servidor	Configurável
	Envio de alarmes	Falha de energia Níveis de consumo
	Capacidade de armazenamento	Até uma semana em modo <i>offline</i>
<b>Canais de entrada</b>	Tensão	400 V, 50/60Hz
	Corrente	Tensão diferencial até no máximo 500mV
	Frequência de amostragem	2kHz
	Resolução do ADC	12bit
<b>Alimentação externa</b>	Alimentação externa	240V, 50/60Hz
	Potência nominal	10W
	Corrente nominal	500mA
	Bateria de <i>backup</i>	3,6V
<b>Dimensões</b>	Dimensões (W x D x H)	220 x 120 x 62mm
	Peso	500g
<b>Normas</b>	Temperatura de funcionamento	-25°C a 85°C
	EMC	EN 61326, EN 61000-3-2, EN 61000-3-3
	Segurança	EN 61010-1
	Protecção	IP67 (EN60529)

Para melhor compreensão do WeSense Energy1 será explicado o modo de funcionamento do seu *hardware* e *software*.

## Hardware

O WeSense Energy1 é composto por vários módulos conforme se apresenta na figura 54. A figura 55 ilustra o diagrama de blocos geral do dispositivo *WeSense Energy1*.

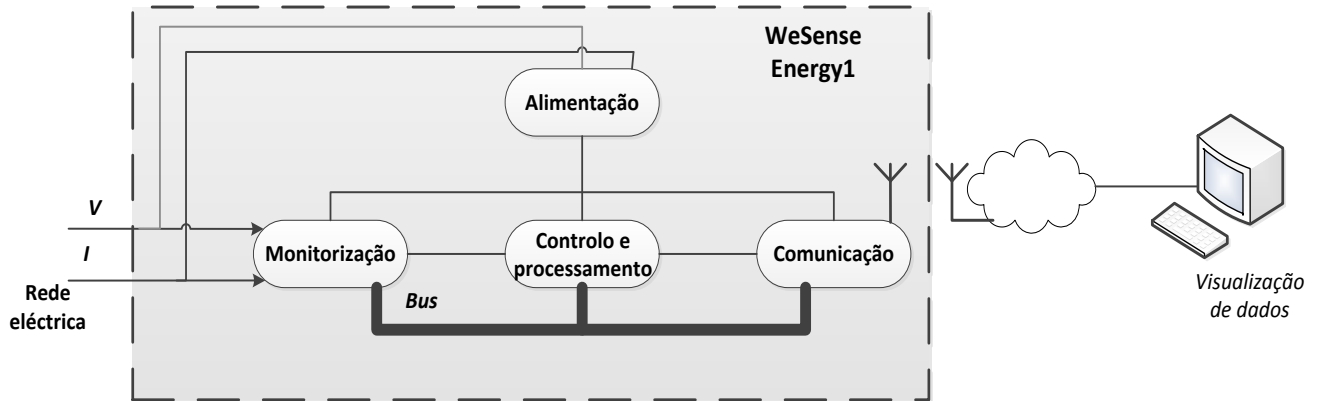


Figura 55 – Diagrama de blocos geral do WeSense Energy1.

## Controlo

O controlo do sistema é realizado pelo Microcontrolador ( $\mu\text{C}$ ) PIC 18F47J53 da *Microchip*. Este microcontrolador apresenta a vantagem da utilização de um sistema USB de baixa tensão, face aos tradicionais microcontroladores PIC18, permitindo assim um alto desempenho computacional e um conjunto de recursos disponíveis a um preço competitivo. Relativamente à memória, a PIC 18F47J53, apresenta uma memória de 128Kb (Microchip, 2010). A figura 56 mostra o *pin-out* da PIC 18F47J53.

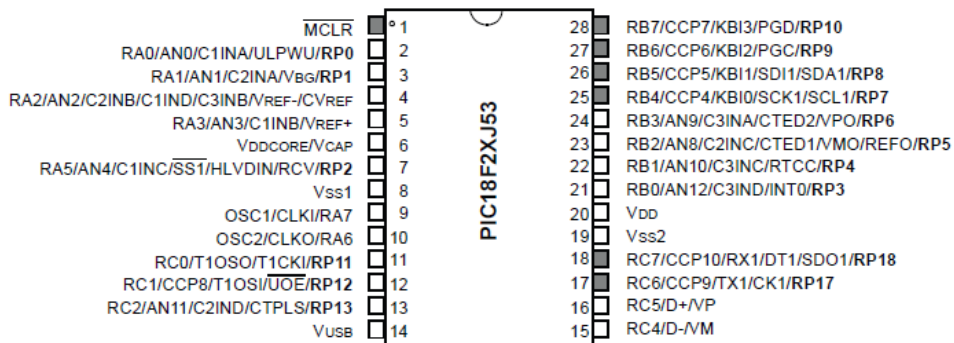


Figura 56 – *Pin-out* da PIC18F47J53.

## Comunicação

O módulo de comunicação é realizado pelo CI ENC6424J600, sendo este projectado com uma interface de rede *ethernet* para  $\mu$ C equipados com uma *serial interface* SPI ou porta paralela (Microchip Technology Inc., 2009). De modo a facilitar a sua utilização, este CI é pré-programado com um único endereço *Media Access Control* (MAC) não-volátil. A figura 57 mostra o *pin-out* do módulo de comunicação ENC6424J600.

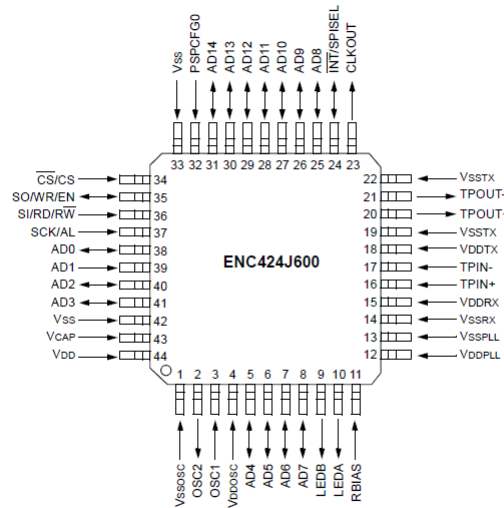


Figura 57 – *Pin-out* do módulo de comunicação ENC6424J600 (Microchip Technology Inc., 2009).

## Monitorização

A monitorização dos parâmetros associados à energia eléctrica, é feita através do CI ADE7880 (Analog Devices, 2012). A utilização do ADE7880 como analisador da QEE é uma alternativa aos convencionais equipamentos. Como foi visto anteriormente, este CI apresenta um custo reduzido associado a um conjunto de potencialidades importantes o que torna preferido para a aplicação em causa.

Recorde-se que o ADE7880 inclui características que mostram os mais recentes avanços na área da análise da energia eléctrica, tais como o uso de potencialidades como FFT e DFT, detecção de harmónicos até à ordem 63, entre outros.

Todas estas potencialidades tornam o ADE7880 num CI de complexidade elevada relativamente à sua utilização na monitorização da QEE. Ao nível da aquisição de dados são necessárias configurações específicas para o seu funcionamento que os equipamentos

convencionais dispensam. Apresenta um *datasheet* extenso e denso (mais de 100 páginas), com informação detalhada sobre configurações e aquisição dos parâmetros.

O fabricante deste CI, a *Analog Devices*, dispõe de uma *evaluating board*, para a utilização do ADE7880 que, em conjunto com um *software* permite ao utilizador usufruir de todas as suas funcionalidades. A figura 58 mostra o diagrama de blocos da *evaluating board* do ADE7880, da *Analog Devices*.

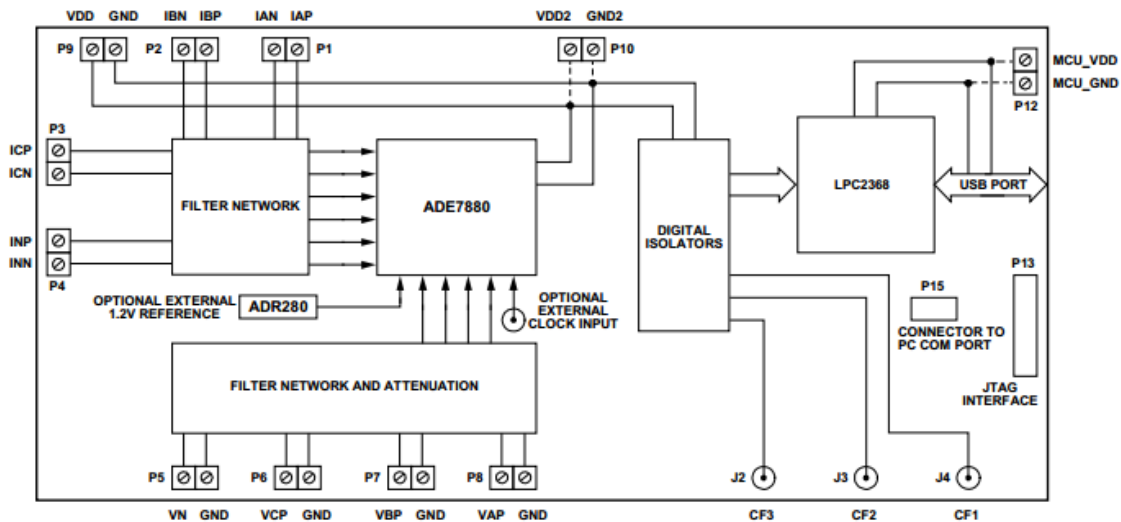


Figura 58 – Diagrama da *evaluating board* do ADE7880 (Analog Devices, 2012).

Esta *evaluating board* permite ao utilizador usar de todas funcionalidades do ADE7880 através da utilização de um *software* específico. Este *software* contém dois módulos desenvolvidos, um em NXP LPC2368 e outro desenvolvido em LabVIEW. A figura 59 mostra o painel inicial do *software* de apoio à monitorização de energia.

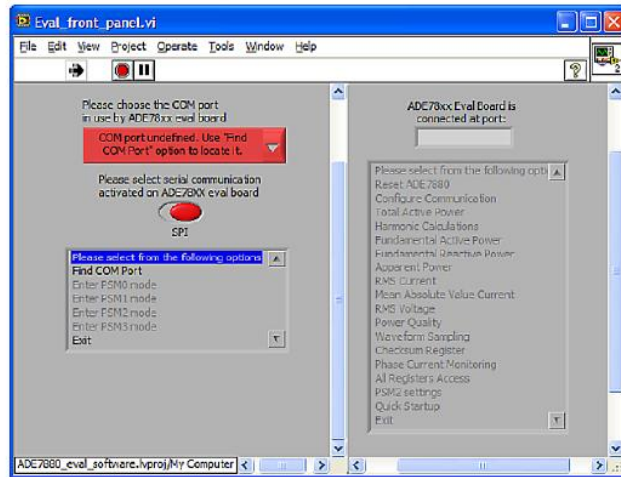


Figura 59 – Painel inicial do *software* de apoio à monitorização de energia (Analog Devices, 2012).

Este *software* é proprietário, não *open source* e especificamente orientado para a *evaluating board*. Dado que o ADE7880 se encontra numa outra plataforma, o WeSense Energy1, houve a necessidade da Evoleo Technologies desenvolveu o seu próprio *software* de aquisição de dados. Seguidamente expõe-se o *software* utilizado juntamente com o dispositivo WeSense Energy1.

### ***Software da Evoleo Technologies***

O *software* desenvolvido pela Evoleo Technologies, para o WeSense Energy1 permite adquirir parâmetros característicos da rede eléctrica e que são parte das funcionalidades permitidos pelo ADE7880, tais como o valor eficaz da tensão e corrente, as potências activa, reactiva e aparente, a frequência, o factor de potência e o consumo das energias activa, reactiva e aparente. Os dados adquiridos são exibidos para acesso remoto numa página *web* para posterior consulta.

Na secção seguinte será apresentada a definição do projecto WeSense Energy2

## **4.2. Definição do projecto**

Conforme anteriormente referido é necessário expandir as funcionalidades do WeSense Energy1 para que permita funcionar como um AQEE (WeSense Energy2). Trata-se de conseguir adquirir a totalidade de parâmetros que podem ser disponibilizados pelo

ADE7880. Recorde-se que o WeSense Energy1 apenas permite extrair conhecimentos sobre eficiência energética, ou seja, obter dados de tensões, correntes e potências.

O primeiro passo para a concretização deste trabalho consistiu em estudar totalmente o WeSense Energy1 tanto a nível do *hardware* como do *software*. Este trabalho foi algo extenso em parte devido à própria complexidade dos componentes envolvidos. A título de exemplo refira-se que o *datasheet* do ADE7880 tem mais de 100 páginas muitas das quais de alguma densidade matemática. Alguns pontos encontram-se propositadamente pouco claros dado que envolvem algoritmos confidenciais e patenteados. Durante o decorrer do trabalho foi mesmo necessário recorrer ao apoio técnico da Analog Devices para esclarecer pormenores de funcionamento e parametrização do CI em causa.

O procedimento consistiu em analisar e compreender em detalhe o *software* anteriormente desenvolvido com vista à extensão das suas funcionalidades numa fase posterior. Também esta etapa foi algo morosa e longa dado que se trata de uma actividade de baixo nível, isto é, de linguagem muito próxima da máquina.

Feita a completa caracterização do estado actual do WeSense Energy1 o passo seguinte passou pela definição do estado final do WeSense Energy2 que envolve:

- A definição do novo funcionamento de cada unidade do WeSense Energy2.
- A lista de requisitos para a implementação do projecto.

De seguida será apresentado novo funcionamento de cada unidade do WeSense Energy2.

### **4.3. WeSense Energy2**

O funcionamento do WeSense Energy2 depende da troca de informação conforme apresentado na figura 60.

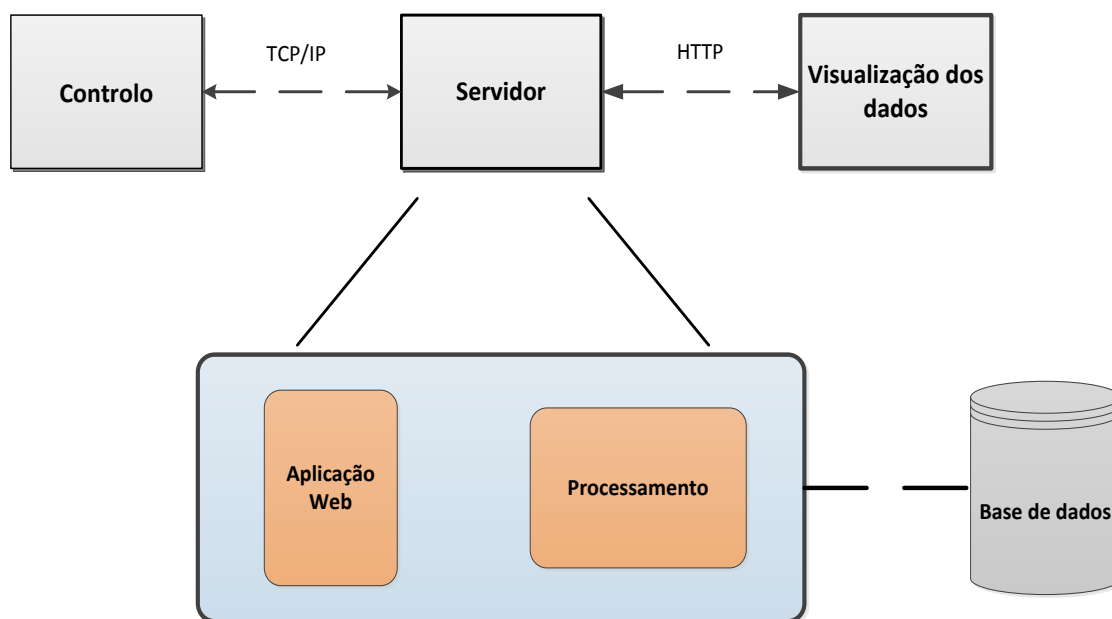


Figura 60 – Diagrama de blocos do funcionamento do sistema WeSense Energy2.

O módulo de *controlo* deverá permitir o envio de dados através de pacotes TCP/IP, que posteriormente vão ser decodificados pelo núcleo de processamento, pertencente ao servidor.

O *servidor* é constituído por um núcleo de processamento e pela aplicação *web* e deve realizar duas funções. Por um lado deverá aceitar os pedidos de visualização dos dados na página *web* e por outro permitir a recepção dos pacotes de dados enviados pelo módulo de controlo.

O *núcleo de processamento* será responsável, não só pela recepção contínua e decodificação dos pacotes TCP/IP, mas também pelo acesso e disponibilização dos dados na base de dados. É da responsabilidade do núcleo de processamento, o envio das respostas aos pedidos do cliente para visualização dos dados.

A *página web* será desenvolvida com recurso a linguagens de programação que cumprem os requisitos do protocolo HTTP e desta maneira o servidor aguarda pelos pedidos HTTP para que sejam disponibilizados ao cliente para visualização.

#### 4.4. Lista de requisitos

Considerando a definição e objectivos do projecto, procedeu-se à elaboração de uma lista de requisitos que devem ser cumpridos durante o estágio. A tabela 10 mostra a lista de requisitos para a concretização do WeSense Energy2.

Tabela 10 – Requisitos do sistema.

Re.ID	Descrição do requisito	Método de verificação
FUN 1	Tem de receber pacotes de informação provenientes do WeSense Energy.	Teste
FUN 2	O equipamento tem de permitir fazer a monitorização de energia em sistemas trifásicos.	Teste
FUN 3	O equipamento tem de permitir a ligação em estrela e triângulo.	Teste
FUN 4	A configuração da gama das entradas de corrente deve ser configurável através de uma página de configuração	Teste
FUN 5	Tem de guardar os dados na base de dados	Teste
FUN 6	A recepção do pacote de dados, provenientes do WeSense Energy tem de ser desenvolvido em linguagem C, utilizando o <i>software</i> MPLABX.	Desenho
FUN 7	O equipamento tem de monitorizar três tipos de energia: Energia Activa, Energia Reactiva e Energia Aparente	Teste
FUN 8	Poderá ser acrescentado o envio da informação sobre o desvio do neutro ( <i>Neutral Current Mismatch</i> ).	Teste
FUN 9	O equipamento tem de monitorizar o valor das potências em todas as fases.	Teste
FUN 10	O equipamento tem de monitorizar o valor eficaz da corrente e tensão em cada fase.	Teste
FUN 11	O equipamento tem de realizar a medição do factor de potência	Teste

<b>Re.ID</b>	<b>Descrição do requisito</b>	<b>Método de verificação</b>
FUN 12	O equipamento deve realizar a monitorização de harmónicos até ao 63º harmónico	Teste
FUN 13	O intervalo de transmissão de dados deve ser de segundo a segundo.	Teste
FUN 14	O equipamento tem de detectar sobretensões e sobrecorrentes	Teste
FUN 15	O equipamento tem de detectar o desfasamento entre as fases	Teste
FUN 16	O equipamento tem que ter comunicação TCP/IP.	Desenho
FUN 17	O sistema tem que garantir que os dados enviados pelo equipamento terminal são correctamente recebidos pelo servidor.	Teste
FUN 18	O equipamento terá de enviar dados relacionados com o estado actual.	Teste
FUN 19	O equipamento deve armazenar as falhas de alimentação do equipamento como eventos.	Teste
FUN 20	Tem de ser possível configurar e manipular a informação proveniente do equipamento através de uma página Web.	Teste
FUN 21	Tem de existir uma página de reconfiguração do WeSense Energy com todos os parâmetros reconfiguráveis	Teste
FUN 22	A configuração do IP e porta do servidor são feitos através da página interna.	Teste
FUN 23	Os dados provenientes do equipamento devem ser armazenados na base de dados.	Teste
FUN 24	A sincronização do clock será feita pelo servidor sempre que são enviados dados para o servidor	Teste
FUN 25	A página web tem de permitir a visualização dos dados de forma legível	Teste
FUN 26	A página web tem de permitir a visualização dos dados através de gráficos	Teste

Re.ID	Descrição do requisito	Método de verificação
FUN 27	As linguagens de programação a utilizar, deverão cumprir os requisitos do protocolo HTTP.	Teste
FUN 28	A monitorização de energia deve obedecer a norma de energia IEC 61000-4-7 e IEC 61000-30.	Teste
FUN 29	Relativamente à EMC, o equipamento tem de obedecer às normas IEC 61000-3-3, IEC 61000 3-2 e EN 61326	Teste

Na secção seguinte serão apresentadas as opções tomadas para a realização do projecto.

#### 4.5. Estudo e opções do projecto

Após a determinação do tipo de dados a adquirir, foram analisadas várias hipóteses para desenvolver o projecto. De acordo com a metodologia de trabalho da empresa foram apresentadas opções de desenvolvimento, seguindo-se depois a sugestão da melhor opção e selecção da solução.

A utilização do  $\mu$ C PIC18F47J53 resulta da metodologia adoptada pela empresa onde se realizou o estágio. A recepção dos pacotes de dados será desenvolvida em linguagem C utilizando o *software* MPLABX. A escolha deste *software* decorreu do facto de este ser *open source* e assim estar acessível para *download* e posterior utilização.

Por sua vez a interface gráfica será desenvolvida com recurso às linguagens *JAVASCRIPT* e *HTML*.

No capítulo seguinte pretende-se apresentar pormenorizadamente todas as opções tomadas para a implementação do projecto.





# 5. Implementação da solução

Este capítulo apresenta as actividades desenvolvidas para dar resposta à proposta de solução. São apresentados os métodos utilizados e clarificadas ainda as opções adoptadas para a concretização deste trabalho.

De acordo com o modelo de monitorização anteriormente apresentado, o WeSense Energy2 deve então permitir realizar as operações básicas de monitorização e verificação e ainda as operações avançadas de monitorização, isto é, monitorização por condição e monitorização em tempo real.

Pretende-se expor detalhadamente a arquitectura usada para o sistema, bem como para todas as etapas do projecto ao nível da aquisição de dados provenientes da monitorização de energia, do processamento dos dados e da aplicação *web*.

Estes temas serão tratados e explicados nas subsecções seguintes.

## 5.1. Arquitectura do sistema

A arquitectura do sistema deve incluir os módulos apresentados no diagrama de blocos da figura 61.

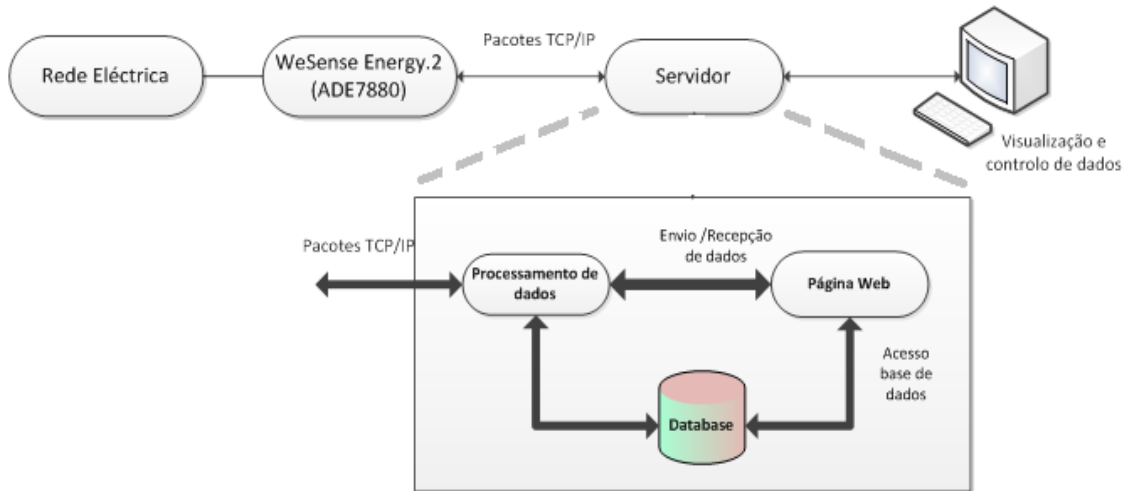


Figura 61 – Arquitectura do sistema WeSense Energy2.

Conforme se pode observar, os dados, provenientes de eventos ocorridos na rede eléctrica de energia, vão ser adquiridos através do dispositivo WeSense Energy2. Uma vez efectuada a monitorização de eventos, os dados são tratados e enviados, através de um ficheiro do tipo XML, para um servidor local. O servidor deve ser capaz de receber não só os dados adquiridos, mas também efectuar o envio e recepção de dados de acordo com os pedidos efectuados pelo utilizador para a apresentação da página *web*. O servidor é constituído por um núcleo de processamento e pela página *web*, que vão ser expostos nos subcapítulos seguintes.

### 5.1.1. Servidor

O bloco referente ao servidor permite que um conjunto de *scripts* PHP, responsáveis pela decodificação dos pedidos efectuados ao servidor, possam obter informação da base de dados ou armazenar e envia-la para o cliente, assim que solicitado.

O bloco servidor é constituído por dois blocos referentes o núcleo de processamento de dados e à página *web*. Estes blocos vão ser apresentados seguidamente.

### ***Núcleo de processamento***

O *núcleo de processamento* é responsável não só pela recepção e descodificação dos dados, mas também pelo armazenamento na base de dados e envio de resposta sobre as configurações do sistema. O funcionamento do núcleo de processamento requer a utilização de três blocos, o bloco *parsing*, o bloco *listener* e o bloco de acesso à base de dados. A figura 62 mostra os blocos constituintes do núcleo de processamento.

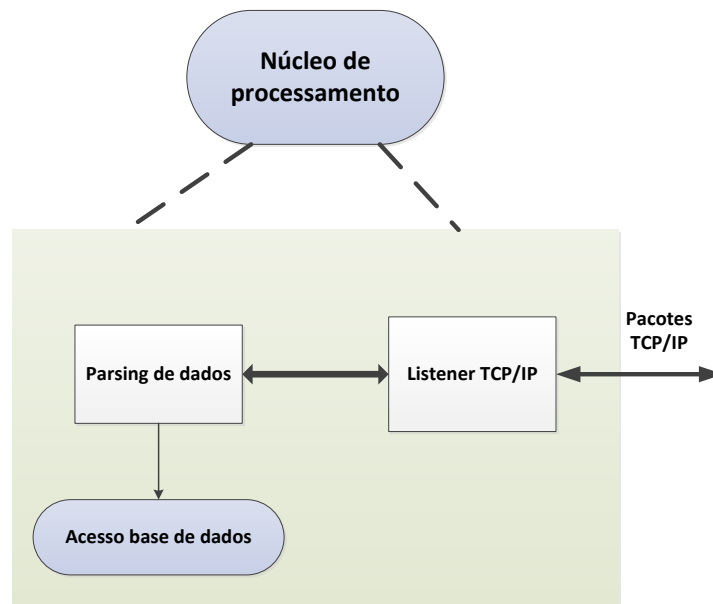


Figura 62 – Diagrama de blocos do núcleo de processamento.

Conforme se pode observar, o bloco *listener* é responsável pela comunicação do núcleo de processamento, enquanto que o bloco *parsing* é responsável pela descodificação e interpretação dos dados. O bloco de acesso à base de dados permite o armazenamento dos dados e a consulta dos mesmos sempre que solicitado.

O núcleo de processamento é uma das partes mais importantes deste trabalho e foi desenvolvido em linguagem C para complementar das funções desempenhadas pelo WeSense Energy2.

### ***Página web***

A *página web* permite ao utilizador gerir as monitorizações efectuadas, permitindo o acesso aos dados monitorizados sempre que assim for solicitado. Adiante serão fornecidas explicações mais detalhadas.

## 5.2. Aquisição de dados

A aquisição de dados é feita através do desenvolvimento de programa em linguagem C. Todos os parâmetros a monitorizar são de acordo com os que CI ADE7880 permite. Deste modo, o programa que permite a obtenção dos dados a monitorizar segue o fluxograma apresentado na figura 63.

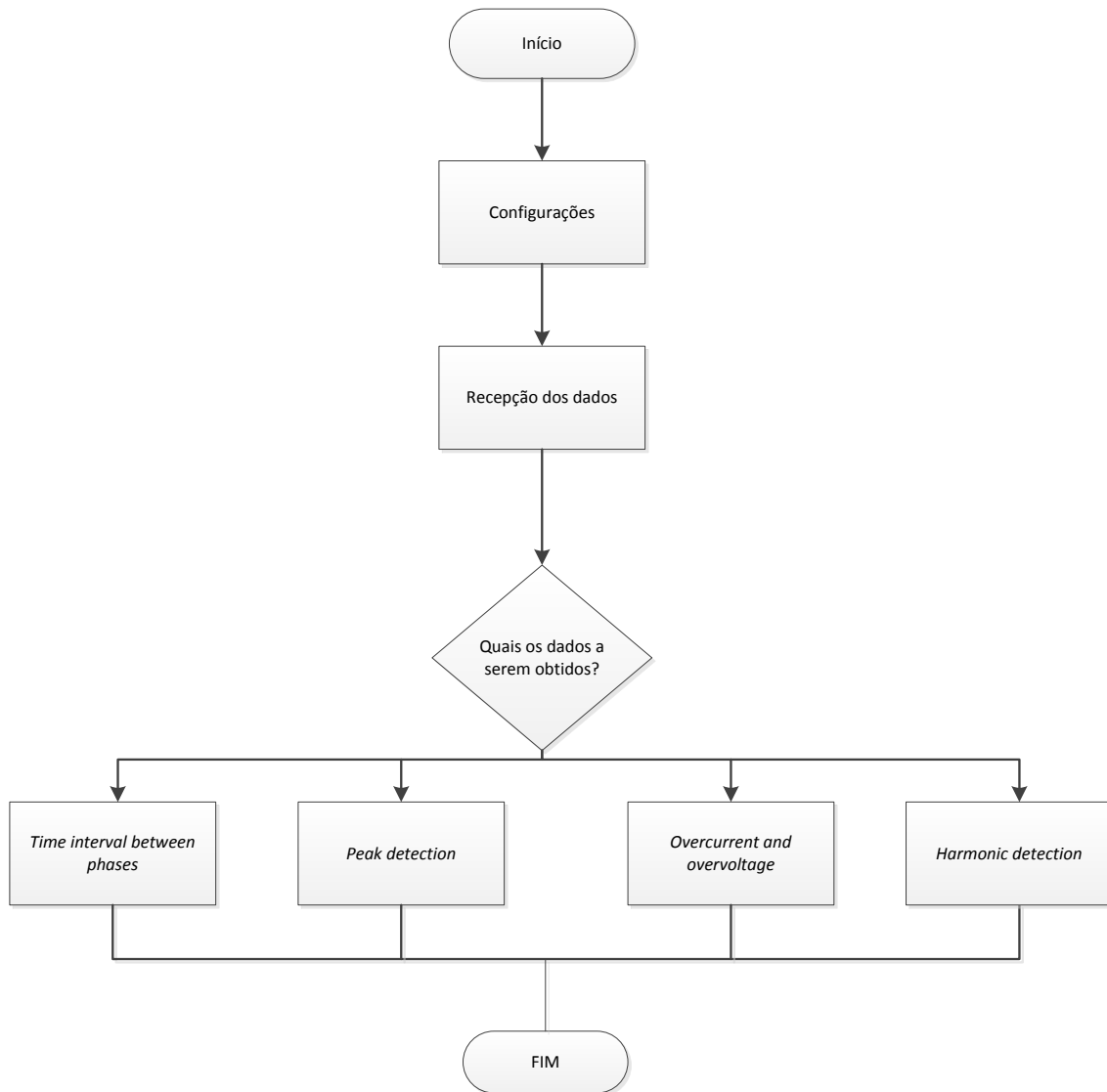


Figura 63 – Fluxograma geral do sistema.

Inicialmente, é necessário realizar as configurações de todos os dispositivos. Seguidamente procede-se à obtenção dos dados pretendidos através da configuração dos registos do ADE7880, sendo o respectivo procedimento explicado nos subcapítulos seguintes.

### 5.2.1. Desfasamento entre as fases (*time interval between phases*)

Num sistema trifásico ideal tem-se um desfasamento constante entre fases de 120°, podendo existir um desfasamento entre tensão e corrente de cada fase compreendida entre +90° e -90°. Num sistema real o desfasamento entre fases não é exactamente 120°.

O ADE7880 tem a capacidade de registar o ângulo de atraso entre as tensões e correntes de cada fase, ou entre a tensão e corrente da mesma fase, através da configuração dos bits ANGLESEL [9:10] do registo COMPMODE (16 bits). De acordo com o modelo de aquisição de dados, esta operação é uma monitorização em tempo real.

Os bits ANGLESEL seleccionam qual ou quais os parâmetros que vão ser monitorizados. A tabela 11 apresenta as possíveis configurações dos bits ANGLESEL do registo COMPMODE.

Tabela 11 – Configuração dos bits ANGLESEL do registo COMPMODE.

		Configuração	Definição
Registo COMPMODE	Bit [10:9] ANGLESEL	00	Desfasamento entre a tensão e a corrente.
		01	Desfasamento entre tensões.
		10	Desfasamento entre correntes.
		11	Sem medição de desfasamento.

Na implementação do WeSense Energy2 optou-se por obter o desfasamento entre as tensões.

Após a configuração dos bits ANGLESEL, o valor do desfasamento é armazenado nos registos de 16 bits ANGLE0, ANGLE1 e ANGLE2 que correspondem cada um a desfasamentos entre duas fases, ou seja:

- ANGLE0 – Desfasamento entre as fases A e C.
- ANGLE1 – Desfasamento entre as fases B e C.
- ANGLE2 – Desfasamento entre as fases A e B.

O valor decimal em graus (°) do desfasamento entre fases é obtido através do cálculo da equação 2, onde ANGLE<sub>x</sub> corresponde ao valor adquirido através dos registos ANGLE<sub>x</sub> e  $f_{LINE}$  ao valor da frequência da rede (50kHz ou 60kHz).

$$\cos \varphi_x = ANGLE_x \times \frac{360^\circ \times f_{LINE}}{256kHz}$$

Equação 2

Esta equação será posteriormente utilizado para a descodificação dos dados.

### 5.2.2. Picos de corrente e tensão (*peak detection*)

Entende-se por valor de pico a amplitude da forma de onda, que corresponde ao máximo valor no eixo vertical, da tensão e corrente.

O ADE7880 permite o registo dos valores máximos absolutos atingidos pela tensão e corrente ao longo de um certo número de ciclos *half-line* armazenando-os nos registos VPEAK e IPEAK de 32 bits. Repare-se que, de acordo com o modelo de monitorização estabelecido, esta é uma monitorização em tempo real.

O registo PEAKCYC contém o número de ciclos *half-line* a serem usados como uma base de tempo para cada medição. A decisão de qual a fase que vai ser monitorizada é realizada através dos bits PEAKSEL [4:2] do registo MMODE (16 bits) e podem apresentar a configuração apresentada na tabela 12.

Tabela 12 – Configuração dos bits PEAKSEL do registo MMODE.

		Bit 4	Bit 3	Bit 2	Definição
Registo MMODE PEAKSEL (16 bits)		0	0	1	Monitorização na fase A
		0	1	0	Monitorização na fase B
		1	0	0	Monitorização na fase C
		1	1	1	Monitorização das três fases em simultâneo

A identificação de picos de tensão ou corrente foi monitorizada nas três fases em simultâneo.

Após a ocorrência de pico de corrente ou tensão, é identificada a fase onde o evento ocorreu através da leitura dos bits IPPHASE [26:24] (no caso da corrente) do registo IPEAK ou VPPHASE [26:24] (no caso da tensão) do registo VPEAK.

Por exemplo, se o valor de pico foi identificado na fase A, o bit 24 é definido com impulso 1. Se um novo valor de pico é detectado na fase B, o bit 24 passa a 0 e o bit 25 é definido com impulso um, como podemos ver na figura 64.

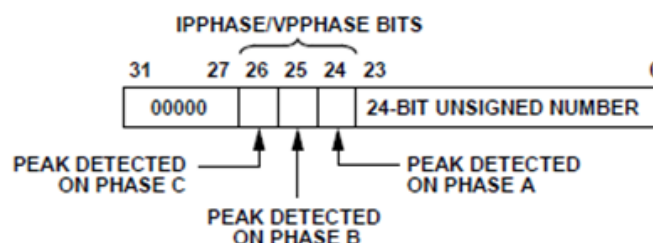


Figura 64 - Composição dos registos IPEAK e VPEAK do ADE7880

O valor máximo absoluto atingido pela tensão e corrente é registado nos 24 bits menos significantes [24:0] dos registos IPEAK ou VPEAK.

### 5.2.3. Sobrecorrentes e sobretensões (*Overcurrent and overvoltage detection*)

Como referido anteriormente, uma sobretensão ou sobrecorrente ocorre quando, o seu valor nominal é excedido.

O ADE7880 permite detectar o valor de uma sobrecorrente ou sobretensão. Isto acontece quando o valor absoluto, medido nos canais de tensão e corrente, torna-se maior do que os limites estabelecidos pelos registos OVLVL e OILVL. Deste modo, verifica-se uma monitorização por condição ou *watch point*.

O procedimento para identificar eventos de sobretensão é o seguinte:

1. Activar os bits [18:17] OV (*overvoltage*) e OI (*overcurrent*) do registo MASK1 (32 bits) definindo-o com impulso 1.
2. A fase onde se desencadeou uma sobretensão ou sobrecorrente é identificada através da leitura dos bits OIPHASE [5:3], no caso de sobrecorrentes, e nos bits OVPHASE [11:9], no caso de sobretensões, do registo PHSTATUS (16bits), como consta a tabela 13.

Tabela 13 – Descrição do resultado obtido nos bits OIPHASE e OVPHASE do registo PHSTATUS.

Configuração		Bit 5	Bit 4	Bit 3	Descrição
OIPHASE E [5:3]		0	0	1	Ocorrência de uma sobrecorrente na fase A.
		0	1	0	Ocorrência de uma sobrecorrente na fase B.
		1	0	0	Ocorrência de uma sobrecorrente na fase C.
Registo PHSTATUS		Bit11	Bit10	Bit 9	
	OVPHASE SE [11:9]	0	0	1	Ocorrência de uma sobretensão na fase A.
		0	1	0	Ocorrência de uma sobretensão na fase B.
		1	0	0	Ocorrência de uma sobretensão na fase C.

#### 5.2.4. Harmónicos (*harmonic detection*)

O ADE7880 permite análise harmónica em cada fase, permitindo que sejam analisados N número de harmónicos dentro de uma largura de banda de 2,8kHz, sendo que o número máximo absoluto de harmónicos detectados pelo ADE7880 é 63, como mostra a equação 3.

$$N = \left\lfloor \frac{2800}{f} \right\rfloor, \leq 63 \quad \text{Equação 3}$$

Os harmónicos são calculados, simultaneamente, em grupos de três e são determinados pelos registos HX, HY e HZ (8 bits). Se for pretendido a análise dos harmónicos de ordem 2, 4 e 8, deve-se atribuir o valor da ordem aos registos referidos, isto é, HX=2, HY=4 e HZ=8.

A obtenção do valor dos harmónicos é realizada utilizando o seguinte procedimento:

1. Escolha de uma fase para base de tempo, através dos bits ACTPHSEL [9:8] do registo HCONFIG (16 bits).
2. Determinação da fase que vai ser monitorizada, através da configuração dos bits HPHASE [2:1] do registo HCONFIG (16bits).

3. Configuração dos bits HRATE [7:5] e HSTIME [4:3] do registo HCONFIG que permitem seleccionar o tempo entre cada cálculo dos harmónicos.
4. Escolha da ordem dos harmónicos a monitorizar, configurando os registos HX, HY e HZ com o valor da ordem pretendida, neste caso 3,5 e 7.

A leitura dos valores dos harmónicos de tensão ou corrente eficaz são exibidos nos registos HXVRMS, HYVRMS, HZVRMS e HXIRMS, HYRMS, HVRMS. A figura 65 ilustra o diagrama de blocos referente à monitorização de harmónicos.

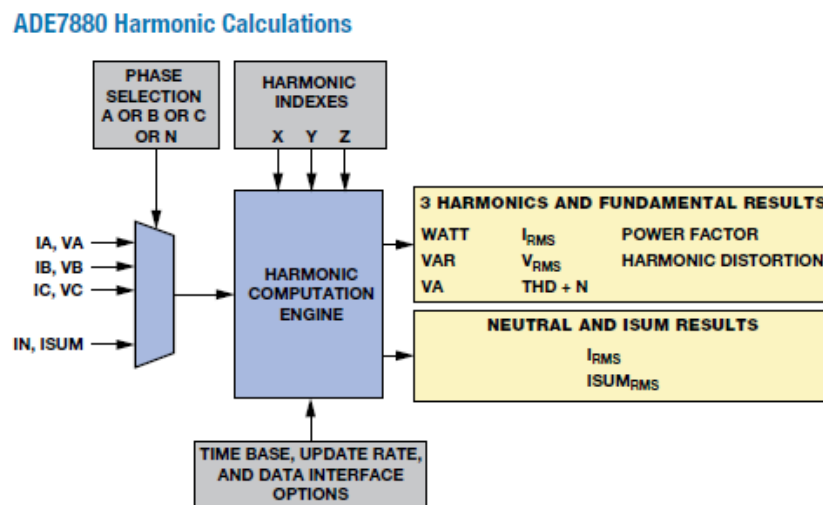


Figura 65 – Monitorização de harmónicos (Analog Devices, 2012).

A monitorização de harmónicos é uma monitorização em tempo real que não necessita da imposição de alguma condição.

Todos os dados monitorizados são enviados para o servidor num formato do tipo XML, permitindo assim estruturar, armazenar e transferir informações necessárias. Um exemplo da forma como o ficheiro XML está executado, pode ser verificado no excerto de código da figura 66.

```
<response>
<L1_L3>~ANGLE_PHASE(0)~</L1_L3>
<L2_L3>~ANGLE_PHASE(1)~</L2_L3>
<L1_L2>~ANGLE_PHASE(2)~</L1_L2>
</response>
```

Figura 66 – Excerto de código do ficheiro XML.

Na secção seguinte pretende-se demonstrar a interface da plataforma *web* do WeSense Energy2, tirando proveito da informação recolhida pelo WeSense Energy1.

### 5.3. Plataforma *web*

Nesta secção pretende-se demonstrar a interface da plataforma *web* desenvolvida para visualização e gestão dos dados provenientes do WeSense Energy2. A figura 67 apresenta o diagrama da plataforma *web* do AQEE.

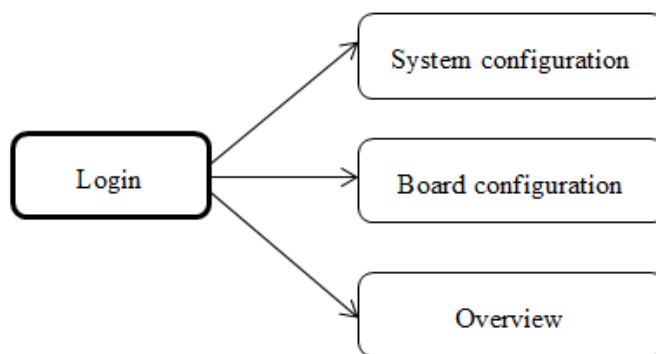


Figura 67 – Mapa da plataforma *web* do AQEE.

Após o *login* o utilizador pode aceder a três páginas, a página *System configuration* que permite a configuração do sistema, a página *Board Configuration* que possibilita a configuração e das definições da placa de rede e a página *Overview* onde podem ser vistos os dados provenientes da monitorização.

#### ***System configuration***

A página *System configuration* permite realizar a configuração do sistema. Isto é, permite que o utilizador escolha um conjunto de configurações necessárias para a monitorização de energia e obter os dados da rede eléctrica, tais como:

- *Connection type* (tipo de conexão da rede eléctrica).
- *Connection frequency* (valor da frequência da rede).
- *Voltage level* (valor da tensão).

- *Watt-hour* (potência injectada na rede).

A figura 68 mostra a interface gráfica da página *System Configuration*.

## System Configuration

ERROR: Some of the data filled are incorrect. Try again.  
SUCCESS: Tiwise has already saved the new settings.

**System Definitions**

Name:

Description:

Date/Time:

Connection Type:

Connection Freq.:

Nominal Primary Current:

WTHR [READONLY]:

VLEVEL [READONLY]:

NOLOAD [READONLY]:

Figura 68 - Interface gráfica da página *System Configuration*

### ***Board configuration***

A página *Board configuration* permite obter as configurações relativas às definições da placa de rede. Entre as configurações destacam-se as seguintes parâmetros:

- *Media Access Control (MAC) address*.
- *Host Name*.
- *IP adress*.
- *Subnet Mask*.
- *Primary Domain Name System (DNS)*.
- *Secondary DNS*.



## AQEE - Overview

AQEE - General description:	
System Name:	~sys_name~
System Description:	~sys_desc~
Tiwise IP Address:	~config_ip~
Tiwise MAC Address:	~config_mac~
Tiwise Power State:	
Config. Date/Time:	~sys_cmfdate~
AQEE - Measurements:	
Voltage rms:	L1: - V L2: - V L3: - V
Current rms:	L1: - A L2: - A L3: - A
Active Power:	L1: - W L2: - W L3: - W
Apparent Power:	L1: - VA L2: - VA L3: - VA
Reactive Power:	L1: - VAR L2: - VAR L3: - VAR
Power Factor:	L1: - L2: - L3: -
Frequency:	L1: - Hz L2: - Hz L3: - Hz
Consumed Active Energy:	- kWh L1: - L2: - L3: -
Consumed Apparent Energy:	- kVAh L1: - L2: - L3: -
Consumed Reactive Energy:	- kVARh L1: - L2: - L3: -
Interval between phases:	L1_L3: -° L2_L3: -° L1_L2: -°
Peak detection:	Current: Phase detection: - Current peak: - A Voltage: Phase detection: - Voltage peak: - V
Overvoltage	Phase detection: -
Overcurrent	Phase detection: -
Harmonic detection	
Voltage rms:	Harmonic_3: - V Harmonic_5: - V Harmonic_7: - V
Current rms:	Harmonic_3: - A Harmonic_5: - A Harmonic_7: - A

Copyright © 2013 AQEE

Figura 71 – Interface gráfica da página principal do AQEE.

Na secção seguinte pretende-se realizar um resumo da descrição da solução apresentada.

### 5.4. Resumo do capítulo da descrição de solução

O projecto desenvolvido consistiu em estender as funcionalidades dos WeSense Energy1, tornando-o num AQEE, o WeSense Energy2. Este desenvolvimento incluiu o estudo profundo do WeSense Energy1, tanto a nível do *hardware* como do *software*.

O sistema desenvolvido permitiu implementar o modelo de monitorização proposto que inclui as operações básicas e avançadas de monitorização. Para a operação de verificação utilizaram-se valores que podem ser opção do utilizador ou das normas actualmente em vigor. Para tal foi necessário a análise pormenorizada das normas inerentes à qualidade de energia eléctrica e que demonstraram uma elevada importância para a validação do trabalho.

Todo o sistema desenvolvido necessitou do desenvolvimento de cerca de mil linhas de código, divididas pela aquisição de dados, manipulação de dados e pela página *web*. No entanto não é permitida a apresentação em anexo do código desenvolvido por motivos de confidencialidade da empresa.

# 6. Validação

Uma fase importante em qualquer trabalho desenvolvido inclui a validação como forma de avaliar a compatibilidade com os requisitos que orientam o respectivo desenvolvimento.

Nesta secção pretende-se apresentar a validação do projecto desenvolvido e dos requisitos exigidos pelas normas para o seu cumprimento.

## 6.1. Validação do projecto

A validação do trabalho desenvolvido consistiu num conjunto de teste que permitiram avaliar o desempenho do WeSense Energy2, a nível do *hardware* e do *software*.

Dado que não foram feitas alterações a nível do *hardware* existente, nesta fase foram apenas feitos testes elementares para que fosse verificado o correcto funcionamento de todos os componentes. Estes testes permitiram que na fase de implementação do *software* não ocorrem erros provenientes do funcionamento dos componentes que constituem o *hardware*, como por exemplo falta de alimentação.

A validação do projecto procurou principalmente validar o *software* implementado. Os testes realizados permitiram validar todas as funções implementadas para obter as principais funcionalidades do WeSense Energy2, a aquisição de dados, o seu processamento e a plataforma remota para visualização dos dados. Por imposição da empresa concentram-se esforços a nível da verificação exaustiva do *software* desenvolvido.

Para finalizar necessitou-se de uma análise ao cumprimento dos requisitos exigidos pelas normas de qualidade de energia de modo a validar se o WeSense Energy2 se encontra em conformidade com as mesmas.

Nas secções seguintes apresentam-se a validação do cumprimento das normas associadas ao sistema desenvolvido e a validação dos requisitos iniciais estipulados.

## **6.2. Cumprimento das normas**

Este trabalho destaca os casos de estudo de detecção de defeitos da QEE, com medições obtidas em conformidade com a normalização existente. Neste contexto, os requisitos exigidos nas normas de qualidade de energia eléctrica IEC 61000-4-7 e IEC 61000-4-30, demonstram elevada importância para a concretização do WeSense Energy2.

A norma IEC 61000-4-30 apresenta técnicas gerais de teste e medição no que diz respeito a medições de parâmetros relacionados com a qualidade de energia eléctrica. Por outro lado, a norma IEC 61000-4-7 apresenta técnicas de teste e medição de harmónicos e inter-harmónicos utilizando os limites impostos pela norma IEC 61000-3-2. A figura 72 mostra quais as normas que estabelecem os métodos de teste e medição dos parâmetros associados à qualidade de energia eléctrica.

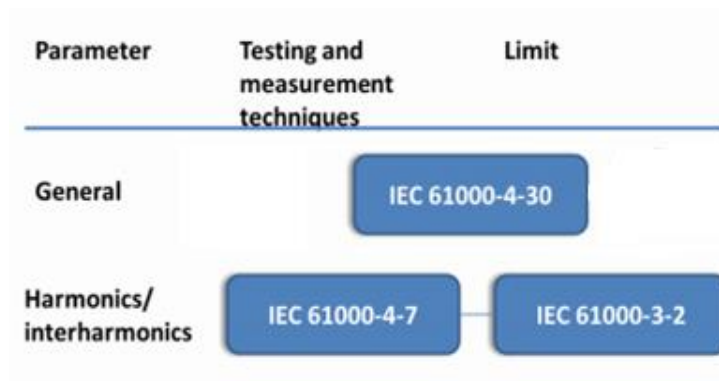


Figura 72 – Normalização associada à monitorização da qualidade de energia eléctrica.

De seguida serão apresentados dos requisitos impostos pelas normas mencionadas.

### ***IEC 61000-4-30***

Como foi anteriormente referido, a norma IEC 61000-4-30 define os métodos de medição e interpretação de resultados provenientes da qualidade de energia em redes eléctricas com frequência igual a 50Hz ou 60 Hz. Esta norma classifica as medições em duas classes, a classe de medição A e a classe de medição B, sendo da responsabilidade do utilizador do equipamento escolher a classe de acordo com a aplicação final do equipamento (IEC, 2003).

As medições dos parâmetros podem ser realizadas em redes eléctricas monofásicas ou trifásicas. Dependendo do que é pretendido, podem-se realizar medições entre fase e neutro, medições entre fases (linha-a-linha) ou medições entre neutro e terra. A medição de uma característica específica pode ser adversamente afectada pela aplicação de um distúrbio no sinal eléctrico de entrada, como por exemplo o desequilíbrio da tensão de alimentação pode ser afectado se, ao mesmo tempo, estiver sujeito a um distúrbio de origem harmónica. Deste modo, o resultado de uma medição de um qualquer parâmetro deve estar dentro de uma incerteza específica, de acordo com a classe de medição pretendida.

As tabelas 14 e 15 mostram gama de variação dos valores dos parâmetros medidos de acordo com a classe A e a classe B respectivamente.

Tabela 14 – Gama de variação dos parâmetros medidos, Classe A (IEC, 2003).

Influence quantities	Range of variation
Frequency	42,5 Hz – 57,5 Hz for 50 Hz systems 51 Hz – 69 Hz for 60 Hz systems
Voltage magnitude (steady-state)	0 % – 200 % of $U_{din}$
Flicker ( $P_{st}$ )	0 – 20
Unbalance	0 % – 5 %
Harmonics (THD)	Twice the values in IEC 61000-2-4, class 3
Interharmonics (at any frequency)	Twice the values in IEC 61000-2-4, class 3
Mains signalling voltage	0 % – 9 % of $U_{din}$
Transient voltages according to IEC 61180	6 kV peak
Fast transients	4 kV peak
NOTE $P_{st}$ shall be produced by periodic modulation.	

Tabela 15 - Gama de variação dos parâmetros medidos, Classe B (IEC, 2003).

Influence quantities	Range of variation
Frequency	42,5 Hz – 57,5 Hz for 50 Hz systems 51 Hz – 69 Hz for 60 Hz systems
Voltage magnitude (steady-state)	0 % – 150 % of $U_{din}$
Unbalance	0 % – 5 %
Harmonics (THD)	Twice the values in IEC 61000-2-4, class 3
Interharmonics (at any frequency)	Twice the values in IEC 61000-2-4, class 3
Mains signalling voltage	0 % – 9 % of $U_{din}$

### ***IEC 61000-4-7***

O ADE7880 realiza medições de harmônicos e inter-harmônicos de acordo a norma IEC 61000-4-7. De acordo com esta norma são permitidas medições de harmônicos, medições de inter-harmônicos, com frequência até 9kHz. A análise dos resultados é feita através das transformadas de Fourier, *Discret Fourier Transform (DFT)* e *Fast Fourier Transform (DFT)*.

De acordo com a norma, as medições são efectuadas em concordância com as classes de medições, Classe I e Classe II. Estas classes permitem a utilização de instrumentos simples e de baixo custo, de acordo com os requisitos da aplicação. A tabela 16 mostra os requisitos de precisão para medições de corrente, tensão e potência de acordo com as classes de medição.

Tabela 16 - Requisitos de precisão para medições de corrente, tensão e potência (IEC).

Classe	Medição	Condições
I	Tensão	$U_m \geq 1\% U_{nom}$ $U_m < 1\% U_{nom}$
	Corrente	$I_m \geq 3\% I_{nom}$ $I_m < 3\% I_{nom}$
	Potência	$P_m \geq 150W$ $U_m < 150W$
II	Tensão	$U_m \geq 3\% U_{nom}$ $U_m < 3\% U_{nom}$
	Corrente	$I_m \geq 10\% I_{nom}$ $I_m < 10\% I_{nom}$

Os limites associados às medições de harmónicos e inter-harmónicos estão estabelecidos na norma IEC 61000-3-2.

### **IEC 61000-3-2**

A norma IEC 61000-3-2 define os limites das componentes harmónicas de corrente para sistemas eléctricos de baixa tensão, para equipamentos com corrente nominal até 16 Ampère (A). Esta norma define um conjunto de classes que permitem a classificação dos equipamentos, a Classe A, Classe B, Classe C e Classe D.

A *Classe A* é referente a equipamentos cujo funcionamento é equilibrado nas três fases, excepto os que são definidos nas classes seguintes. A *Classe B* classifica os equipamentos referentes a ferramentas portáteis. A *Classe C* identifica equipamentos de iluminação, incluindo dispositivos de regulação com potência activa acima de 25 Watt (W). Por último a *Classe D* classifica equipamentos com potência activa fundamental entre 75 e 600 W. Deste modo, são determinados limites das componentes harmónicas de corrente para cada classe. A tabela 17 apresenta os limites das componentes harmónicas de corrente de acordo com as Classes A e B (Pomilio, 2007).

Tabela 17 – Limites da componente harmónica da corrente de acordo com as Classe A e B (Pomilio, 2007).

<u>Class A and Class B</u>		
Harmonic order n	Class A max permissible harmonic current A	Class B max permissible harmonic current A
Odd harmonics		
3	2.30	3.45
5	1.14	1.71
7	0.77	1.155
9	0.40	0.60
11	0.33	0.495
13	0.21	0.315
15 <= n <= 39	2.25/n	3.375/n
Even harmonics		
2	1.08	1.62
4	0.43	0.645
6	0.30	0.45
8 <= n <= 40	1.84/n	2.76/n

A tabela 18 apresenta os valores dos limites da componente harmónica de corrente de acordo com a Classe C.

Tabela 18 – Limites da componente harmónica da corrente de acordo com as Classe C (Pomilio, 2007).

<u>Class C &gt; 25 W</u>	
Harmonic order n	Maximum value expressed as a percentage of the fundamental input current of the luminaries
2	2
3	30 $\lambda^*$
5	10
7	7
9	5
11 <= n <= 39	3

\* $\lambda$  is power factor

A tabela 19 apresenta os valores dos limites da componente harmónica de corrente de acordo com a Classe D.

Tabela 19 – Limites da componente harmónica da corrente de acordo com as Classe D (Pomilio, 2007).

<u>Class D (Rated load condition)</u>		
Harmonic order n	75 W < P < 600 W mA/W	P > 600 W A
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.40
11	0.35	0.22
13	0.296	0.21
15 <= n <= 391	3.85/n	2.25/n

As normas são definidas de modo a fornecer um ponto de partida igual, para a análise da qualidade da energia e permitir que os analisadores de vários fabricantes, produzam o mesmo resultado ou resultados semelhantes. É neste sentido que é de elevada importância saber quais as normas associadas à qualidade de energia e de que maneiras são aplicadas a monitorizações de parâmetros de qualidade de energia eléctrica. Assim, a validação deste trabalho necessitou de um estudo aprofundado dos requisitos estabelecidos pela normalização e que necessitam de ser cumpridos para que o equipamento funcione correctamente e que obtenha assim valores correctos sobre cada parâmetro.

### 6.3. Lista de requisitos validada

A lista de requisitos, definida no início da realização deste projecto foi sujeita a revisão de modo a validar os objectivos que foram atingidos. A tabela 20 apresenta a lista de requisitos validados.

Tabela 20 – Tabela de requisitos validados.

Re.ID	Descrição do requisito	Método de verificação	Aceitação
FUN 1	Tem de receber pacotes de informação provenientes do <i>WeSense Energy</i> .	Teste	Validado
FUN 2	O equipamento tem de permitir fazer a monitorização de energia em sistemas trifásicos.	Teste	Validado

Re.ID	Descrição do requisito	Método de verificação	Aceitação
FUN 3	O equipamento tem de permitir a ligação em estrela e triângulo.	Teste	Validado
FUN 4	A configuração da gama das entradas de corrente deve ser configurável através de uma página de configuração	Teste	Validado
FUN 5	Tem de guardar os dados na base de dados	Teste	Validado
FUN 6	A recepção do pacote de dados, provenientes do <i>WeSense Energy</i> tem de ser desenvolvido em linguagem C, utilizando o <i>software</i> MPLABX.	Desenho	Validado
FUN 7	O equipamento tem de monitorizar três tipos de energia: Energia Activa, Energia Reactiva e Energia Aparente	Teste	Validado
FUN 8	Poderá ser acrescentado o envio da informação sobre o desvio do neutro ( <i>Neutral Current Mismatch</i> ).	Teste	Não implementado
FUN 9	O equipamento tem de monitorizar o valor das potências em todas as fases.	Teste	Validado
FUN 10	O equipamento tem de monitorizar o valor eficaz da corrente e tensão em cada fase.	Teste	Validado
FUN 11	O equipamento tem de realizar a medição do factor de potência	Teste	Validado
FUN 12	O equipamento deve realizar a monitorização de harmónicos até ao 63º harmónico	Teste	Parcialmente validado
FUN 13	O intervalo de transmissão de dados deve ser de segundo a segundo.	Teste	Validado
FUN 14	O equipamento tem de detectar sobretensões e sobrecorrentes	Teste	Validado
FUN 15	O equipamento tem de detectar o desfasamento entre as fases	Teste	Validado
FUN 16	O equipamento tem que ter comunicação TCP/IP.	Desenho	Validado
FUN 17	O sistema tem que garantir que os dados enviados pelo equipamento terminal são correctamente recebidos pelo servidor.	Teste	Validado
FUN 18	O equipamento terá de enviar dados relacionados com o estado actual.	Teste	Validado
FUN 19	O equipamento deve armazenar as falhas de alimentação do equipamento como eventos.	Teste	Validado
FUN 20	Tem de ser possível configurar e manipular a informação proveniente do equipamento através de uma página Web.	Teste	Validado
FUN 21	Tem de existir uma página de reconfiguração do <i>WeSense Energy</i> com todos os parâmetros reconfiguráveis	Teste	Validado
FUN 22	A configuração do IP e porta do servidor são feitos através da página interna.	Teste	Validado

Re.ID	Descrição do requisito	Método de verificação	Aceitação
FUN 23	Os dados provenientes do equipamento devem ser armazenados na base de dados.	Teste	Validado
FUN 24	A sincronização do clock será feita pelo servidor sempre que são enviados dados para o servidor	Teste	Validado
FUN 25	A página <i>web</i> tem de permitir a visualização dos dados de forma legível	Teste	Validado
FUN 26	A página <i>web</i> tem de permitir a visualização dos dados através de gráficos	Teste	Não implementado
FUN 27	As linguagens de programação a utilizar, deverão cumprir os requisitos do protocolo HTTP.	Teste	Validado
FUN 28	A monitorização de energia deve obedecer às classes I e II da norma de qualidade de energia IEC 61000-4-7.	Teste	Validado
FUN 29	Relativamente à EMC, o equipamento tem de obedecer às normas IEC 61000-3-3, IEC 61000 3-2 e EN 61326	Teste	Validado



# 7. Conclusões

Ao longo deste documento foram sendo apresentadas informações que têm subjacente conclusões parciais que permitem justificar as opções de desenvolvimento do projecto.

Nesta secção é realizado um resumo das conclusões, consequências e noções que apresentam uma elevada importância no trabalho realizado.

Todo o trabalho desenvolvido teve por finalidade resolver /minimizar os problemas que a monitorização da qualidade de energia têm vindo a apresentar na gestão e optimização de redes eléctricas.

O maior problema apresentado na monitorização de energia é a instalação temporária dos equipamentos na rede eléctrica, o que resulta numa observação de distúrbios depois destes ocorrerem. Esta metodologia fornece informação acerca de um evento mas não permite uma análise completa de todos os parâmetros de energia (que levam a um evento), durante um evento mas sim após a sua ocorrência. Adicionalmente a este problema acresce os custos elevados dos equipamentos o que limita a sua utilização tradicionalmente para grandes indústrias. Na maioria dos casos, estas limitações impedem que os fenómenos de qualidade de energia sejam completamente resolvidos e impedem a implementação de soluções, que poderiam eliminar futuras reincidências.

É nesta vertente que surgiu a implementação do analisador de qualidade de energia eléctrica, o WeSense Energy2, um equipamento de baixo custo, que permite a

monitorização contínua de parâmetros relacionados com a qualidade de energia eléctrica e que faz parte integrante da rede eléctrica. A monitorização contínua permite estabelecer uma projecção temporal relativa a ocorrência de eventos, tornando possível efectuar uma melhora contínua através da implementação de medidas correctivas.

O WeSense Energy2 foi desenvolvido dando continuidade a um projecto desenvolvido pela empresa Evoleo Technologies, o WeSense Energy1. Este apresenta funcionalidades na área da monitorização de parâmetros característicos da energia eléctrica, tais como tensão, corrente e potência.

Deste modo, foi desenvolvido um sistema com um nível de complexidade elevada, desde a aquisição dos dados, manipulação e visualização remota dos mesmos através de uma página *web*.

A primeira fase do desenvolvimento deste trabalho consistiu num estudo sobre todos os conceitos e normalização associados a qualidade de energia eléctrica e sobre os analisadores de qualidade de energia existentes no mercado. Este estudo inicial mostrou-se assim de extrema importância para a tomada de decisão de como abordar o problema, mostrando assim como a normalização interagia com os conceitos de qualidade de energia eléctrica e como o mercado se encontrava em relação a equipamentos de monitorização da qualidade de energia eléctrica. Posteriormente definiu-se um modelo de monitorização que associado a um conjunto de requisitos orientaram os desenvolvimentos subsequentes. A partir desta fase de enquadramento foi possível desenvolver um trabalho coerente, com objectivos delineados e metas definidas.

Todo o sistema desenvolvido necessitou do desenvolvimento de cerca de mil linhas de código, divididas pela aquisição de dados, manipulação de dados e pela página *web*.

O uso do circuito integrado ADE7880 como analisador de qualidade de energia apresentou uma mais valia na realização deste projecto. Este inclui componentes electrónicos que reflectem os mais recentes avanços na área da análise da energia eléctrica e deste modo alcançou-se um equipamento de baixo custo mas mesmo assim com elevadas potencialidades.

O trabalho desenvolvido destaca ainda a verificação da conformidade com as normas de qualidade de energia, que apresentam actualmente uma importância elevada no mercado energético no que diz respeito à competitividade entre fabricante de equipamentos.

A grande vantagem do equipamento desenvolvido WeSense Energy2 comparativamente a outros com a mesma finalidade é a possibilidade de monitorização contínua da energia

eléctrica e a sua integração na rede eléctrica e deste modo adquirir dados acerca de eventos associados à qualidade de energia eléctrica.

De um ponto de vista pessoal, o desenvolvimento deste trabalho permitiu acima de tudo a participação num projecto de uma empresa consolidada no mundo empresarial o que constituiu uma mais valia para o meu percurso académico.

A constante interacção com os elementos da equipa Evoleo Technologies mostrou-me uma nova visão sobre o mundo empresarial e permitiu-me aprender novos conhecimentos.

O tema abordado neste trabalho permitiu-me ter uma percepção de um dos grandes problemas que afecta a gestão e optimização de redes energéticas e alcançar conhecimentos sobre a normalização associada à qualidade de energia eléctrica e que muitas das vezes não é mencionada com a devida importância a nível académico.



## *Referências Documentais*

- AlpesTechnologies** [Online] / ed. Technologies Alpes. - 2012. - [http://www.alpestechnologies.com/en/Alptec\\_power\\_factor\\_controllers](http://www.alpestechnologies.com/en/Alptec_power_factor_controllers).
- Analog Devices** ADE7880 // Polyphase Multifunction Energy Metering IC whit harmonic Monitoring. - [s.l.] : Analog Devices, Inc., 2012.
- Analog Devices** Evaluating the ADE7880 Energy Metering IC [Online] // Analog Devices. - 2012. - 31 de Outubro de 2013. - [http://www.analog.com/static/imported-files/user\\_guides/UG-356.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/user_guides/UG-356.pdf).
- Baptista José [et al.]** Monitorização digital de parâmetros associados à qualidade de energia eléctrica [Relatório] / Dep. de Engenharia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Dep. de Engenharia Eléctrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. - 2008.
- Caçote José** Aspectos gerais da qualidade de energia [Conferência] // Jornadas Técnicas de Electrotecnia / ed. Universidade do Alarve Dep. Engenharia Electrotecnia. - 2012.
- CENELEC** EN 50160 Características da tensão fornecida pela rede geral de distribuição [Patente]. - 2001.
- CENELEC** EN 50160 Características de tensão fornecida pela rede geral de distribuição [Patente]. - 2001.
- CENELEC** NP EN 45020 Normalização e actividades correlacionadas [Patente]. - 2001.
- CENELEC** Who we are [Online] // CENELEC - European Committee for Electrotechnical Standardization . - <http://www.cenelec.eu/>.
- Costa Carlos J.** JavaScript [Online]. - 2005. - <http://design.itml.org/carlos/cadeiras/sag/doc/05JavaScript.pdf>.
- Diário da República** Regulamento de Qualidade de Serviço [Relatório]. - [s.l.] : Direcção Geral de Geologia e Energia, 2006.
- Dias Fernando** Qualidade de Serviço em sistemas eléctrico de energia [Relatório] / Mestrado em Engenharia Electrotécnica e Sistemas de Energia ; ISEP. - 2008.
- Direcção Geral Biologia e Energia** Regulamento de Qualidade de Serviço [Livro]. - [s.l.] : Diário da República, 2006. - II Série : Vol. II série.
- Driesen Johan e Van Craenenbroek Thierry** Voltage Disturbances, Introduction to Unbalance [Online] // Power Quality Application Guide. - Copper Development Association, Maio de 2002. - <http://www.cda.org.uk>.
- EDP Distribuição** Qualidade de Energia Eléctrica // Experiência EDP como operador da rede de distribuição. - Maio de 2007.
- EDP** Manual da qualidade de energia eléctrica [Relatório] / Departamento de Engenharia Electrotécnica ; Universidade de Coimbra. - 2005.
- ERSE** A ERSE [Online] // ERSE -Entidade Reguladora de Serviços Energéticos. - 2009. - <http://www.erse.pt/pt/aerse/Paginas/default.aspx>.

**Eurelectric** Power Quality in European Electricity Supply Networks [Relatório] / Union of the Electricity Industry . - 2004.

**Evoleo Technologies** [Online]. - 2012. - 2013 de Setembro de 13. - [www.evoleotech.com/home.html](http://www.evoleotech.com/home.html).

**FFONSECA** Analisadores de energia fixos de painel- Janitza [Online] // Gestão de edifícios e domótica. - 2010. - 27 de Outubro de 2013. - [http://www.ffonseca.com/produto.aspx?lang=pt&id\\_object=976477&name=Analisadores-de-energia-fixos-painel---Janitza](http://www.ffonseca.com/produto.aspx?lang=pt&id_object=976477&name=Analisadores-de-energia-fixos-painel---Janitza).

**Freitas Sara** O impacto da qualidade de energia eléctrica na indústria [Relatório] / Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores ; ISEP- Instituto Superior de Engenharia do Porto. - 2011.

**HTML4BLOG** Estrutura básica do HTML [Online]. - 2011. - [http://www.emblema.art.br/html4blog/laranja\\_estrutura.html](http://www.emblema.art.br/html4blog/laranja_estrutura.html).

**IEC** IEC 61000-4-30 // EMC, Part 4-30:Testing and measurement techniques, Power quality measurement methods. - 2003.

**IEC** IEC 61000-4-7 // EMC, Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply.

**IEC International Electrotechnical Commission** How we work [Online] // International Standards and Conformity Assessment for all electrical, electronic and related technologies. - 2013. - <http://www.iec.ch/standardsdev/how/management.htm>.

**IMC** IMC - Integrated Measurement & Control // imc POLARES - More than just power quality analysis. - 2012.

**Inst. Português de Qualidade** Manual de Normalização [Livro]. - [s.l.] : Departamento de normalização, Setembro 2009.

**Jorge Humberto** Qualidade de Energia , Regulamentação e Normalização [Relatório]. - [s.l.] : MEEC, Qualidade de Energia.

**kioskea** o protocolo HTTP [Online]. - 2011. - Setembro de 2013. - <http://pt.kioskea.net/contents/266-o-protocolo-http>.

**KRON** Analisadores de qualidade de energia fixos - ELSPEC G4000 BLACKBOX [Online] // KRON medidores. - 2013. - 14 de Novembro de 2013. - <http://www.kronweb.com.br/br/produtos.php?id=209>.

**LEM** Power Quality Analyser - QWave Premium. - 2005.

**LEM** Power Quality RTU, QWave Light. - 2005.

**Logic Cirrus** Single-Phase Bi-Directional Power/Energy IC [Online] // Products. - 2013. - 19 de Setembro de 2013. - <http://www.cirrus.com/en/products/cs5463.html>.

**Martins J. e Afonso J.** Qualidade de Energia Eléctrica na Indústria // Ciclo de seminários da UEVO:A qualidade de energia eléctrica. - 2003.

**MaximIntegrated** MAXQ3180 [Online] // Low-Power, Multifunction, Polyphase AFE. - 2013. - 15 de Setembro de 2013. - <http://www.maximintegrated.com/datasheet/index.mvp/id/5673>.

**MEGABRAS** MAR 202 Analisador de qualidade de energia em redes eléctricas [Online] // Equipamentos electrónicos de medição. - 09 de 2013. - [http://www.megabras.com/portugues/produtos/mar/MAR\\_202.htm](http://www.megabras.com/portugues/produtos/mar/MAR_202.htm).

**Microchip** PIC18F47J53 Family Data Sheet [Relatório]. - [s.l.] : Microchip Technology Inc., 2010.

**Microchip Technology Inc.** ENC424J600/624J600 Datasheet. - 2009.

**Monteiro Raul** Corrente alternada sinusoidal [Relatório] / Engenharia Electrotécnica e de Computadores ; Escola Superior de Tecnologia de Tomar. - Tomar : [s.n.], 2011.

**Oliveira Fernando Jorge, Torre Hélder Luís e Almeida Jorge Daniel** Qualidade de Energia [Relatório] / Departamento de Electrotécnica e de Computadores ; Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra. - Coimbra : [s.n.], 2004.

**Oliveira Luis** Qualidade de Energia Electrotécnica: Perturbações e soluções reparadoras [Conferência] // Jornadas Técnicas de Electrotécnica. - Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve : [s.n.], 2012.

**Pomilio José Antenor** Electromagnetic Compatibility (EMC) [Online] // Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Departamento de sistemas de controlo de energia. - 2007. - 10 de Novembro de 2013. - <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/IEC.pdf>.

**QEnergia** O impacto dos problemas de qualidade da energia em instalações eléctricas [Conferência] // Ciclo de palestras Ordem dos Engenheiros. - 2001.

**Qualistar** QualiStar+ [Online] // Quadro resumo dos analisadores de qualidade de energia série Qualistar. - 2008. - [http://www.chauvin-arnoux.com/qualistar/eng/ihm\\_eng.aspx](http://www.chauvin-arnoux.com/qualistar/eng/ihm_eng.aspx).

**S.A APLICACIONES TECNOLÓGICAS** Causas das sobretensões e mecanismos de propagação [Online]. - <http://at3w.com/>.

**w3school** [Online] // CSS. - 2013. - 23 de Setembro de 2013. - <http://www.w3schools.com/css/default.asp>.

**w3school** [Online] // Javascript. - 2013. - 23 de Setembro de 2013. - <http://www.w3schools.com/js/default.asp>.

**w3schools** HTML [Online]. - 2013. - 23 de Setembro de 2013. - <http://www.w3schools.com/html/>.