



Universidade do Minho

Pedro Luís Martins da Silva

**Desenvolvimento de um Sistema de
Monitorização de Consumos e de
Qualidade de Energia Elétrica**

Dissertação submetida na Universidade do Minho
para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho realizado sob orientação do
Doutor João Luiz Afonso

e coorientação do
Doutor José Augusto Afonso

Outubro de 2016

DECLARAÇÃO

Pedro Luís Martins da Silva

Endereço eletrónico: pedrosilva619.ps@gmail.com

Título da Dissertação:

Desenvolvimento de um Sistema de Monitorização de Consumos e de Qualidade de Energia Elétrica

Orientador:

Doutor João Luiz Afonso

Coorientador:

Doutor José Augusto Afonso

Dissertação submetida na Universidade do Minho para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, ___/___/_____

Assinatura: _____

Aos meus pais, aos meus irmãos e à minha namorada

Agradecimentos

Em primeiro lugar, queria agradecer ao meu orientador, Professor Doutor João Luiz Afonso, por toda a sua disponibilidade para me ajudar nos pontos mais críticos do projeto e por toda a motivação e recursos que me forneceu na realização deste projeto.

Em segundo lugar, queria agradecer ao meu coorientador, Professor Doutor José Augusto Afonso, pela sua disponibilidade em me ajudar na área de comunicações de dados e pelo interesse mostrado no meu trabalho.

Um agradecimento especial para a Marlene Macedo por o apoio incondicional em todos os momentos e pela sua disponibilidade em ajudar-me a quebrar algumas barreiras encontradas ao longo do projeto.

Um enorme agradecimento investigadores do GEPE por todo o apoio prestado, principalmente na resolução de problemas, e por todo o tempo despenderam em me ajudar.

Por fim, mas não menos importantes queria deixar um agradecimento a todos os meus amigos que me apoiaram em todos os momentos difíceis, ajudando-me a quebrar muitas barreiras na resolução desta dissertação.

Resumo

Nos dias de hoje, a distribuição e entrega de energia elétrica acarreta vários problemas que podem levar ao mau funcionamento dos equipamentos elétricos e, por vezes, danificar os mesmos e/ou produtos que estão dependentes do seu bom funcionamento. Para resolver eficazmente os problemas de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) associados às instalações elétricas é necessário em primeira instância identificá-los. Para este efeito são indispensáveis os Sistemas de Monitorização de QEE, estes têm de possuir características únicas, entre elas, necessitam de ser compactos, robustos, de simples utilização e, como característica principal, necessitam ser de baixo custo.

Este trabalho de mestrado, foi realizado com o objetivo de obter um produto final que possua uma interface de comunicação entre o sistema de aquisição de sinal e o sistema de interface com o utilizador. Posto isto, foi necessário desenvolver o hardware de aquisição de sinal, assim como o software adjacente para uma SoC (*System on Chip*), que possui um processador ARM (*Advanced RISC Machine*) e um DSP (*Digital Signal Processor*). O processador ARM M3 foi utilizado para fazer a aquisição de sinal e para realizar todas as comunicações necessárias, enquanto que o DSP foi utilizado para realizar o cálculo dos parâmetros de QEE. Por fim, foi criado um software para a *Raspberry Pi 3B* de forma a fazer interface com o utilizador através de um LCD (*Liquid Crystal Display*) *touch screen*.

Em suma, este trabalho de dissertação faculta a perceção de alguns eventos de QEE, fornecendo alguma informação em relação ao evento detetado. Este permite verificar o balanceamento da energia num sistema trifásico. Consente que o utilizador possa visualizar as formas de onda dos sinais adquiridos, assim como avaliar graficamente as harmónicas constituintes do sinal registado. Este possui ainda a capacidade de mostrar em tempo real ao seu utilizador o valor dos parâmetros de QEE calculados.

Palavras-chave: Sistema de Monitorização, Qualidade de Energia Elétrica, Instalações Elétricas, Rede Elétrica.

Abstract

Nowadays, electricity's distribution can lead to several issues that can result in electrical equipment malfunction, and sometimes even damage those equipment's or products that depend on their proper functioning. To effectively solve the Power Quality issues related to electrical installations, they must be previously identified. In order to do so, Power Quality Monitoring Systems are imperative, and they must have unique features, such as being compact, robust, simple to use, and especially low-cost.

This Master's work was carried out having in sight the achievement of a final product that has a communication interface between the signal acquisition system and the user interface system. Given this, the development of signal acquisition hardware along with its software was made. The development SoC (*System on Chip*) comprises an ARM (*Advanced RISC Machine*) processor along with a DSP (*Digital Signal Processor*). The ARM M3 processor was used to perform the signal acquisition along with all the needed communications, while the DSP was responsible for the Power Quality parameters computation. Finally, the software for a *Raspberry Pi 3B* was developed in order to provide user interface through an LCD (*Liquid Crystal Display*) touch screen.

Summing up, this dissertations' work allows the detection of some Power Quality events, providing some information related to the detected event. This allows verify the energy balance in a three-phase system. The user can visualize the waveforms of the acquired signals, along with graphically evaluating the presence of harmonics in the registered signal. It also possesses the ability to show to the user, in real-time, the value of the calculated Power Quality parameters.

Keywords: Monitoring System, Power Quality, Electrical Installations, Electrical Network

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	ix
Índice	xi
Lista de Figuras.....	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Acrónimos e Siglas	xix
Nomenclatura.....	xxiii
Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1 Energia Elétrica.....	1
1.2 Enquadramento	2
1.3 Motivações.....	2
1.4 Objetivos e Metodologias	3
1.5 Organização da Dissertação.....	4
Capítulo 2 Qualidade de Energia Elétrica	6
2.1 Introdução.....	6
2.2 Problemas de QEE: Curta Duração.....	7
2.2.1 Cavas de Tensão	8
2.2.2 Sobreensões Momentâneas.....	8
2.2.3 Interrupções Momentâneas.....	9
2.3 Problemas de QEE: Longa Duração	10
2.3.1 Subtensões	11
2.3.2 Sobreensões	11
2.3.3 Interrupções	11
2.4 Problemas de QEE: Transitórios.....	12
2.4.1 Transitórios impulsivos (Surtos de Tensão).....	12
2.4.2 Transitórios Oscilatórios.....	13
2.5 Problemas de QEE: Distorção da Forma de Onda	15
2.5.1 Harmónicas.....	15
2.5.2 Inter-Harmónicas	18
2.5.3 Micro-Cortes.....	19
2.5.4 Interferência Eletromagnética.....	20
2.5.5 Offset DC.....	21
2.6 Tremulação (Flicker)	22
2.7 Variação de Frequência.....	23
2.8 Desequilíbrio de Fases	24
2.9 Conclusão	26
Capítulo 3 Sistemas de Monitorização de Qualidade de Energia Elétrica.....	27
3.1 Introdução.....	27
3.2 Dranetz - PowerXplorer PX5.....	27
3.2.1 Características de Hardware	28
3.2.2 Características de Software.....	30
3.3 Fluke – Fluke 1738 Power Logger.....	38

3.3.1	Características de Hardware	38
3.3.2	Características de Software.....	41
3.4	GEPE – Sistema de Monitorização de QEE	44
3.4.1	Características de Hardware	45
3.4.2	Características de Software.....	46
3.5	Conclusões.....	49
Capítulo 4	Implementação do Sistema de Monitorização	51
4.1	Introdução.....	51
4.2	Hardware.....	51
4.2.1	Sensores de Tensão.....	52
4.2.2	Sensores de Corrente	54
4.2.3	Placa de Condicionamento de Sinal e de ADC.....	55
4.2.4	Placa de Desenvolvimento.....	62
4.2.5	Raspberry Pi 3B e Monitor	66
4.2.6	Resultado Final	67
4.3	Software.....	68
4.3.1	Aquisição de Sinal.....	68
4.3.2	Cálculo dos Parâmetros de Qualidade de Energia Elétrica	71
4.3.3	Interface Gráfica	78
4.3.4	Comunicação de Dados e Tramas Produzidas	86
4.4	Conclusão	91
Capítulo 5	Testes ao Sistema de Monitorização Desenvolvido.....	93
5.1	Introdução.....	93
5.2	Teste Efetuado com Carga Linear.....	93
5.3	Teste Efetuado com Carga Não-Linear.....	102
5.4	Conclusão	106
Capítulo 6	Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro	107
6.1	Conclusões Gerais.....	107
6.2	Sugestões de Trabalho Futuro.....	110
Referências	111
Anexo A	114

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Problemas de QEE de curta duração: cava de tensão.	8
Figura 2.2 - Problemas de QEE de curta duração: sobretensão momentânea.	9
Figura 2.3 - Problemas de QEE de curta duração: interrupção momentânea.	10
Figura 2.4 - Problemas de QEE transitórios: surto de tensão.	13
Figura 2.5 - Problemas de QEE transitórios: transitório oscilatório.	15
Figura 2.6 - Problemas de QEE de distorção da forma de onda: harmónicas.	18
Figura 2.7 - Problemas de QEE de distorção da forma de onda: inter-harmónicas.	19
Figura 2.8 - Problemas de QEE de distorção da forma de onda: micro-cortes.	20
Figura 2.9 - Problemas de QEE de distorção da forma de onda: interferência eletromagnética.	21
Figura 2.10 - Problemas de QEE de distorção da forma de onda: <i>offset DC</i>	22
Figura 2.11 - Problemas de QEE: Tremulação.	23
Figura 2.12 - Problemas de QEE: desequilíbrios de fases.	25
Figura 3.1 - Sistema de monitorização de QEE: <i>Dranetz PowerXplorer PX5</i> [32].	28
Figura 3.2 - <i>Dranetz PowerXplorer PX5</i> : (a) face frontal; (b) face traseira; (c) face superior; (d) face inferior [32].	30
Figura 3.3 - <i>Dranetz PowerXplorer PX5</i> : menu inicial [32].	30
Figura 3.4 - <i>Dranetz PowerXplorer PX5</i> : menu <i>Scope</i> [32].	31
Figura 3.5 - <i>Dranetz PowerXplorer PX5</i> : (a) menu <i>Scope</i> seleccionar canal; (b) menu <i>Scope</i> verificar amplitude dos valores lidos pelos sensores [32].	31
Figura 3.6 - <i>Dranetz PowerXplorer PX5</i> : menu <i>Meter</i> modo <i>Standard</i> [32].	32
Figura 3.7 - <i>Dranetz PowerXplorer PX5</i> : menu <i>Meter</i> modo <i>Distortion</i> [32].	33
Figura 3.8 - <i>Dranetz PowerXplorer PX5</i> : menu <i>Meter</i> modo <i>UserFreq</i> [32].	34
Figura 3.9 - <i>Dranetz PowerXplorer PX5</i> : menu <i>Harmonics</i> [32].	35
Figura 3.10 - <i>Dranetz PowerXplorer PX5</i> : menu <i>Harmonics</i> lista dos valores das harmónicas (a) ordem crescente de frequências; (b) ordem decrescente do valor de pico das harmónicas [32].	36
Figura 3.11 - <i>Dranetz PowerXplorer PX5</i> : menu <i>Phasor</i> [32].	36
Figura 3.12 - <i>Dranetz PowerXplorer PX5</i> : (a) menu <i>Events</i> ; (b) menu <i>Trend</i> [32].	37
Figura 3.13 - Sistemas de monitorização QEE: <i>Fluke 1738</i> [35].	38
Figura 3.14 - <i>Fluke 1738</i> : anexação do módulo <i>wireless</i> [36].	40
Figura 3.15 - <i>Fluke 1738</i> : face frontal [36].	41
Figura 3.16 - <i>Fluke 1738</i> : menu <i>Meter</i> no modo <i>Harmonics</i> [35].	42
Figura 3.17 - <i>Fluke 1738</i> : (a) cálculo do valor eficaz e frequência; (b) verificação da conexão das pontas de prova [35].	43
Figura 3.18 - <i>Fluke 1738</i> : menu <i>Logger</i> [35].	43
Figura 3.19 - Sistema de monitorização desenvolvido pelo GEPE: esquemático de ligações [38].	44
Figura 3.20 - <i>Motherboard</i> integrada no sistema de monitorização desenvolvido pelo GEPE [38].	45
Figura 3.21 - Sistema de monitorização desenvolvido pelo GEPE: Resultado final da montagem do hardware [38].	46
Figura 3.22 - Sistema de monitorização desenvolvido no GEPE: aplicação <i>Scope e THD</i> [38].	47

Figura 3.23 - Sistema de monitorização desenvolvido no GEPE: aplicação <i>EventosPQ</i> [38].	48
Figura 3.24 - Sistema de monitorização desenvolvido no GEPE: aplicação <i>Teoria p-q</i> [38].	49
Figura 4.1 - Esquema de blocos do sistema de monitorização implementado.	52
Figura 4.2 - Sensor de tensão utilizado.	52
Figura 4.3 - Diagrama esquemático dos sensores de tensão utilizados [40].	53
Figura 4.4 - Sensores de corrente utilizados: (a) face lateral; (b) face superior.	54
Figura 4.5 - Diagrama esquemático dos sensores de corrente utilizados [41].	54
Figura 4.6 - (a) Filtro passa-baixo de 1ª ordem; (b) Inversor de tensão.	56
Figura 4.7 - (a) Filtro passa-baixo de 2ª ordem (<i>Butterworth</i>); (b) Filtro RC.	56
Figura 4.8 - Sinal de teste de todos os filtros passa-baixo estudados.	58
Figura 4.9 - Esquema eletrónico da montagem amplificadora para a placa de condicionamento de sinal.	60
Figura 4.10 - Esquemático da ficha de conexão da placa de ADC com a placa de desenvolvimento.	61
Figura 4.11 - Resultado final da placa de condicionamento de sinal e de ADC.	62
Figura 4.12 - Mapa de periféricos da placa de desenvolvimento [45].	63
Figura 4.13 - Placa de desenvolvimento (F28M35H52C1), incluída na sua <i>dock station</i> .	64
Figura 4.14 - Barramento presente na placa de desenvolvimento para conexão dos periféricos [48].	65
Figura 4.15 - Raspberry Pi 3 modelo B.	67
Figura 4.16 - Montagem de todo o hardware do sistema de monitorização.	67
Figura 4.17 - Esquemático temporal de leitura de dados do ADC externo.	69
Figura 4.18 - Fluxograma para a função de detetar eventos de QEE.	71
Figura 4.19 - Fluxograma para o cálculo do valor de pico do sinal lido.	75
Figura 4.20 - Janela deslizante utilizada para o cálculo dos parâmetros.	78
Figura 4.21 - Interface gráfica: menu <i>Scope</i> .	78
Figura 4.22 - Interface gráfica: menu <i>Scope</i> seleção do modo de operação pretendido.	79
Figura 4.23 - Interface gráfica: menu <i>Scope</i> selecionando a corrente e a tensão numa das fases.	80
Figura 4.24 - Interface gráfica: menu <i>Harm</i> .	81
Figura 4.25 - Interface gráfica: menu <i>Harm</i> seleção dos valores pretendidos.	82
Figura 4.26 - Interface gráfica: menu <i>Phase</i> .	83
Figura 4.27 - Interface gráfica: menu <i>Data</i> .	84
Figura 4.28 - Interface gráfica: menu <i>Energy</i> .	85
Figura 4.29 - Interface gráfica: menu <i>Events</i> .	86
Figura 4.30 - Trama de dados: três tensões.	87
Figura 4.31 - Trama de dados: tensão e corrente por fase.	89
Figura 4.32 - Trama de dados: harmónicas nas três tensões.	89
Figura 4.33 - Trama de dados: harmónicas por fase.	89
Figura 4.34 - Trama de dados: desfasamento entre as fases.	90
Figura 4.35 - Trama de dados: todos os parâmetros calculados dos sinais.	90
Figura 4.36 - Trama de dados: valores das potências e da energia.	90
Figura 4.37 - Trama de dados: data e hora.	91
Figura 4.38 - Trama de dados: eventos detetados.	91
Figura 5.1 - Esquema de Montagem do primeiro teste efetuado – Carga Linear.	94
Figura 5.2 - Carga Linear: menu <i>Scope</i> mostrado as tensões nas fases.	94

Figura 5.3 - Carga Linear: menu <i>Scope</i> mostrando as tensões nas fases e a tensão neutro-terra.	95
Figura 5.4 - Carga Linear: menu <i>Scope</i> mostrando as correntes das fases.....	96
Figura 5.5 - Carga Linear: menu <i>Scope</i> mostrando a corrente nas fases e no neutro.	96
Figura 5.6 - Carga Linear: menu <i>Scope</i> mostrando as formas de onda da tensão e da corrente na fase A.....	97
Figura 5.7 - Carga Linear: menu <i>Harm</i> mostrando as amplitudes das harmónicas das três tensões.	98
Figura 5.8 - Carga Linear: menu <i>Harm</i> mostrando as amplitudes das harmónicas das três correntes.	98
Figura 5.9 - Carga Linear: menu <i>Harm</i> mostrando as amplitudes harmónicas da corrente e da tensão na fase A.	99
Figura 5.10 - Carga Linear: menu <i>Phase</i>	100
Figura 5.11 - Carga Linear: menu <i>Data</i>	100
Figura 5.12 - Carga Linear: menu <i>Energy</i>	101
Figura 5.13 - Carga Linear: menu <i>Events</i>	102
Figura 5.14 - Carga não-linear acrescentada à fase A.	102
Figura 5.15 - Carga Não-Linear: menu <i>Scope</i> mostrando as tensões.	103
Figura 5.16 - Carga Não-Linear: menu <i>Scope</i> mostrando as correntes.	104
Figura 5.17 - Carga Não-Linear: menu <i>Harm</i> mostrando as harmónicas das tensões.	104
Figura 5.18 - Carga Não-Linear: menu <i>Harm</i> mostrando as harmónicas das correntes.	105
Figura 5.19 - Carga Não-Linear: menu <i>Data</i>	106

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Problemas de Qualidade de Energia Elétrica [5].	7
Tabela 2.2 - Valores das tensões harmónicas nos pontos de entrega de tensão até á ordem 25 [5].	16
Tabela 2.3 - Sequência das harmónicas [15].	17
Tabela 3.1 - <i>Dranetz PowerXplorer PX5</i> : mensagens sobre a amplitude dos valores lidos [32].	32
Tabela 4.1 - Valor padrão para o dimensionamento da resistência de medida dos sensores de tensão utilizados [40].	53
Tabela 4.2 - Valor padrão para o dimensionamento da resistência de medida dos sensores de corrente utilizados [41].	55
Tabela 4.3 - Resposta dos diferentes filtros passa-baixo para diferentes frequências.	58
Tabela 4.4 - Valores dimensionados para as resistências das montagens amplificadoras.	60
Tabela 4.5 - Descrição dos pinos da ficha do ADC e respetivo acoplamento à placa de desenvolvimento.	61
Tabela 4.6 - Comandos enviados pelo sistema de interface para o servidor.	88

Acrónimos e Siglas

Acrónimo / Sigla	Significado
AC	<i>Alternating Current</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
AmpOp	Amplificador Operacional
ARM	<i>Advanced RISC Machine</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CC	Corrente Contínua
CCS	<i>Code Composer Studio</i>
CENELEC	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i>
CONVST	<i>Convert Start</i>
CTOM	<i>C28 To M3</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DPF	<i>Displacement Power Factor</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
DVI	<i>Digital Visual Interface</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
EOC	<i>End Of Conversion</i>
EOLC	<i>End Of Last Conversion</i>
ePWM	<i>Enhanced Pulse Width Modulator</i>
ESC	<i>Electronic Speed Controller</i>
FAP	Filtro Ativo de Potência
FAT	<i>File Allocation Table</i>

FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FPU	<i>Floating-Point Unit</i>
GEPE	Grupo de Eletrónica de Potência e Energia
GIC	<i>Geomagnetically Induced Current</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
HDMI	<i>High-Definition Multimedia Interface</i>
I2C	<i>Inter-integrated Circuit</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
IPC	<i>Interprocessor Communications</i>
LabView	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LVUR	<i>Line Voltage Unbalance Rate</i>
MSG	<i>Message</i>
MT	Média Tensão
MTOC	M3 To C28
NEMA	<i>National Equipment Manufacturer's Association</i>
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
PC	<i>Personal Computer</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>
P_{lt}	<i>Long Term Flicker Perceptibility</i>
PQ	<i>Power Quality</i>
P_{st}	<i>Short Term Flicker Perceptibility</i>
PVUR	<i>Phase Voltage Unbalance Rate</i>

PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RD	<i>Read</i>
RFFT	<i>Real Fast Fourier Transform</i>
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SCI	<i>Serial Communications Interface</i>
SD	<i>Secure Digital</i>
SMD	<i>Surface-Mount Device</i>
SoC	<i>System on Chip</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SSI	<i>Synchronous Serial Interface</i>
TFT	<i>Thin Film Transistor</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
TID	<i>Total Interharmonics Distortion</i>
TIF	<i>Telephone Influence Factor</i>
TPF	<i>Total Power Factor</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VGA	<i>Video Graphics Array</i>
VUF	<i>Voltage Unbalance Factor</i>
WR	<i>Write</i>

Nomenclatura

E_a	Energia ativa	kWh
E_r	Energia reativa	kVArh
f	Frequência da tensão da rede elétrica	Hz
f_a	Frequência de amostragem	Hz
f_c	Frequência de corte	Hz
ϕ_i	Ângulo de defasamento entre a tensão e a corrente	°
$f[u]$	Amostras de uma função no domínio do tempo	
F	Amostras de uma função no domínio das frequências	
G	Ganho	
h	Harmónica atual	
H	Número total de harmónicas	
i	Valor instantâneo da corrente	A
I_P	Corrente no primário dos sensores de tensão	A
I_{RMS}	Valor eficaz da corrente	A
I_S	Corrente no secundário dos sensores	A
n	Valor da amostra atual	
N	Número total de amostras	
Q	Fator de qualidade dos filtros <i>Butterworth</i>	
Q	Potência reativa	VAr
P	Potência ativa	W
ϕ_h	Valor do defasamento	°
R_G	Resistência de ganho	Ω
R_i	Resistência de entrada dos sensores de tensão	Ω
R_M	Resistência de medida dos sensores	Ω
S	Potência aparente	VA
T	Período	s
T_a	Temperatura ambiente	°C
THD	Distorção harmónica total	%

TPF	Fator de potência total	
v	Valor instantâneo da tensão	V
V_f	Amplitude da tensão à frequência fundamental do sinal	V
V_h	Amplitude da harmónica atual	V
V_{in}	Tensão de entrada	V
V_{mean}	Valor médio	V
V_O	Tensão de saída	V
V_{RMS}	Valor eficaz	V

Capítulo 1

Introdução

1.1 Energia Elétrica

No decorrer do século XX o desenvolvimento científico entrou em voga trazendo grandes melhorias na qualidade de vida humana. Uma das alterações foi o acesso à energia elétrica pelas habitações e indústrias, que por vezes se situam nos sítios mais remotos e de difícil acesso.

Com este desenvolvimento tecnológico, a eletricidade tornou-se algo imprescindível à vida humana, pois, quer a nível industrial, quer a nível doméstico, todos os dias é necessário utilizar a energia elétrica. O recurso à energia elétrica é tão evidente no dia-a-dia que chega mesmo a ser impensável uma falha neste sistema, ou a indisponibilidade do mesmo, pois esta pode ser associada a perdas económicas muito significativas.

O aumento em grande escala do consumo de energia elétrica levou a comunidade científica a preocupar-se e a debruçar-se no desenvolvimento de cargas otimizadas em termos de consumo. Deste modo, com poucas alterações no sistema elétrico foi possível diminuir o consumo individual das cargas. Por outro lado, esta preocupação levou à integração nas redes elétricas de cargas não-lineares, ricas em consumo de correntes harmónicas [1]. Dentro desta temática, surge o conceito de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), que tenta estudar, limitar, mitigar e encontrar soluções para os problemas adjacentes à rede elétrica de forma a minimizar os custos de consumo e rentabilizar a energia [2].

No ramo da QEE é extremamente necessário identificar os problemas que surgem em determinados ramos da rede elétrica, para que desta forma seja possível estudar e produzir um conjunto de soluções para reduzir ao máximo os efeitos destes, ou mesmo corrigir a origem destas anomalias. De forma a tornar a afirmação anterior possível, são necessários sistemas de vigilância nas linhas elétricas que possuam características únicas, características essas que facilitem a visualização, a perceção de fenómenos periódicos, fenómenos rápidos ou mesmo faltas de energia elétrica, interferindo o mínimo possível com o sistema elétrico.

Concluindo, os sistemas elétricos evoluíram muito no último século e ainda estão em constante mutação. Desta forma, cabe à comunidade científica identificar soluções para que

se tornem cada vez mais eficazes, visto que o aumento da dependência desta energia é cada vez mais evidente. A formulação deste trabalho vem de encontro desta temática, sabendo-se que antes de corrigir é necessário identificar os problemas que se pretendem corrigir. Por isso, os sistemas de monitorização de QEE com relação de consumos são uma eminente necessidade nos dias de hoje.

1.2 Enquadramento

Nos últimos anos têm-se assistido a um aumento muito significativo no consumo de energia elétrica a nível mundial. Por consequência, houve também um aumento bastante significativo de cargas não-lineares no sistema elétrico, empobrecendo desta forma a qualidade da energia. Por este motivo e de forma a contrariar os efeitos bastantes negativos de uma pobre qualidade de energia surgiram os sistemas de monitorização que gravam em memória alguns acontecimentos sobre o sistema de distribuição de energia elétrica [3]. Desta forma, os responsáveis pela manutenção e planeamento daquele ramal elétrico ficam informados e conscientes sobre as possíveis soluções a adotar para mitigar essas anomalias.

Esta dissertação tem como suporte à sua elaboração o Grupo de Eletrónica de Potência e Energia (GEPE) da Universidade do Minho. O grupo tem encontrado algumas soluções para mitigar problemas de QEE, desta forma é imprescindível recorrer a um bom sistema de monitorização de QEE. O sistema de monitorização proposto neste trabalho pode ajudar, nesta tarefa do grupo, recolhendo e gravando dados fidedignos de forma a serem utilizados pelos investigadores. Pode ainda ajudar a validar os resultados obtidos após a implementação e inserção do equipamento produzido no sistema elétrico.

Por fim, é de salientar que o desenvolvimento de um sistema deste género pode auxiliar não só a comunidade científica, mas também o mundo empresarial a encontrar soluções mais eficazes para mitigar os problemas de QEE. Por isso, o GEPE tem reunido esforços de forma a criar um sistema de monitorização com o máximo de funcionalidades possíveis, para que possam avaliar as condições em que é entregue a energia elétrica aos clientes.

1.3 Motivações

Tendo por base o sistema elétrico, cuja importância tem vindo a aumentar, sendo utilizado por todos os tipos de cargas, desde uma simples lâmpada até ao mais complexo sistema de controlo numa linha de montagem, a QEE é bastante importante pois se esta for pobre, ou seja, se a QEE for baixa, poderá ter impactos bastante negativos nas cargas, reduzindo o

tempo de vida destas ou podendo danificar produtos dependentes do bom funcionamento das mesmas.

Os sistemas de monitorização de QEE e de consumos de energia elétrica são imprescindíveis a nível mundial, pois a falta ou falha de energia elétrica tem um impacto global afetando diversos setores. Neste sentido a realização de um sistema deste tipo requer muita precisão e atenção, pois este pode ser utilizado não só para verificar os problemas de energia elétrica, mas também para validar as possíveis soluções, como foi referido anteriormente.

Com o desenvolvimento de um sistema de monitorização é possível obter competências tanto na criação de software, leitura de valores do ADC (*Analog-to-Digital Converter*) e posterior tratamento da informação recolhida, como no desenvolvimento de hardware. Ao nível do software é imprescindível adquirir competências em comunicações de forma a processar e enviar os dados para um sistema de interface com o utilizador. A nível de hardware é possível obter competências no dimensionamento e no desenho final do sistema de aquisição de sinal e ainda no dimensionamento de sensores analógicos de forma que possam interagir com o sistema de aquisição de sinal e realizar a leitura dos valores de corrente e tensão da rede elétrica.

Posto isto, a realização deste projeto vai fornecer conhecimento sobre os problemas de QEE, implementação de software, técnicas de deteção de eventos, filtros *anti-aliasing*, implementação de hardware, implementação de comunicações Ethernet, de eletrónica de potência, de sistemas embebidos, de *cross-compile* e de programação em *Qt-Linux*. Este trabalho tem a particularidade de conciliar duas áreas bastante distintas, sendo estas a Eletrónica de Potência e Sistemas Embebidos, ambas com bastante impacto no mercado atual.

1.4 Objetivos e Metodologias

A realização desta dissertação tem como objetivo compreender de forma mais concisa quais são os problemas associados às redes elétricas. Para tal, é crucial a construção de um sistema de monitorização com armazenamento de dados em memória e que detenha a capacidade de informar o utilizador sobre problemas de qualidade de energia de curta duração, na maioria das vezes estes fenómenos são impercetíveis ao olho humano.

Assim sendo, este trabalho visa desenvolver um Sistema de Monitorização de QEE, que seja capaz de guardar em memória não volátil a informação sobre fenómenos rápidos que acontecem nas linhas elétricas (e.g., cavas de tensão e interrupções momentâneas). Por outro

lado, tem de ser também capaz de enviar informações para o utilizador através de um sistema de interface. O mesmo deverá ainda ser capaz de se manter ligado mesmo que ocorra uma falha de energia elétrica, ou seja, será necessário a utilização de uma fonte de energia secundária, para que isto se torne possível.

Neste sentido, os principais objetivos desta dissertação são:

- I. Estudo das legislações de QEE e desenvolvimento do Sistema de Monitorização de QEE;
- II. Estudo sobre eventos de QEE e técnicas de deteção dos mesmos;
- III. Desenvolvimento do sistema de condicionamento de sinal e dimensionamento dos sensores necessários;
- IV. Desenvolvimento do software de aquisição e tratamento de dados;
- V. Estudo das interfaces de comunicações e posterior incorporação no Sistema de Monitorização;
- VI. Teste final com cargas previamente desenvolvidas no laboratório do GEPE.

Em suma, para o desenvolvimento desta dissertação foi necessário adquirir novas competências, tanto na construção de hardware, como no desenvolvimento de software. Em nota, é de salientar que para a realização de circuitos impressos foi utilizado o PADS, o CCS (*Code Composer Studio*) para o software de aquisição de sinal e a comunicação *wireless* e o *Qt-Linux* para desenvolver a interface gráfica do Sistema de Monitorização de QEE.

1.5 Organização da Dissertação

Este documento está organizado seguindo a ordem do desenvolvimento do tema desta dissertação. Como tal, este documento segue uma linha cronológica dos processos realizados no desenvolvimento do sistema de monitorização proposto, inicializando com o estudo dos problemas de Qualidade de Energia Elétrica e do estado da arte, passando pela implementação e teste do sistema de monitorização e terminando com um conjunto de conclusões.

No Capítulo 2 são abordados os problemas de QEE em que para alguns destes problemas é possível visualizar uma caracterização segundo a norma portuguesa NP EN 50160. Para cada um dos problemas são destacadas as causas, algumas possíveis soluções e consequências dos mesmos. Estes problemas de QEE apresentados fazem-se acompanhar de um gráfico no qual

é demonstrada a forma de onda que os sinais adquirem quando estão sujeitos a estas anomalias.

No Capítulo 3 é elaborado um estudo sobre o estado-da-arte, nele pode-se encontrar dois bons exemplos de sistemas de monitorização que se encontram no mercado e um exemplo implementado no GEPE no âmbito de uma dissertação de mestrado. Para cada um dos aparelhos é caracterizado o hardware e o seu software. Por fim é realizado um estudo comparativo entre os aparelhos e são apresentadas algumas razões pelas quais ainda é muito interessante desenvolver aparelhos deste género.

O Capítulo 4 é dividido em dois grandes grupos, no primeiro grupo é apresentado o hardware implementado, bem como as principais razões que levaram a escolha dos componentes utilizados. No segundo grupo é mostrado todo o processo de construção do software para as plataformas selecionadas. Neste encontra-se os algoritmos de cálculo utilizados, as configurações das interfaces de comunicações que foram utilizadas e por fim, as tramas de dados que foram implementadas para que as comunicações inter-processadores fossem um êxito.

No Capítulo 5 são disponibilizados todos os testes realizados ao sistema de monitorização implementado no âmbito desta dissertação. Os testes foram realizados com o recurso a um variac e a duas cargas diferentes. Neste capítulo podem ser revistas todas as funcionalidades do sistema de monitorização, mas todas com resultados de leituras reais.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões relativas à implementação deste trabalho, definidas as dificuldades encontradas na implementação e as soluções encontradas para ultrapassar essas mesmas dificuldades. Neste capítulo são ainda apresentadas algumas sugestões para trabalho futuro.

Capítulo 2

Qualidade de Energia Elétrica

2.1 Introdução

Qualidade de Energia Elétrica (QEE), ou *Power Quality* (PQ), na literatura inglesa, segundo a entidade IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) é “O conceito de alimentação e ligação à terra de equipamentos eletrónicos sensíveis de uma forma adequada ao seu funcionamento” [2][4, pag.6]. No entanto, outras entidades reguladoras de energia elétrica têm uma definição diferente de QEE, como é exemplo, a IEC (*International Electrotechnical Commission*), que define QEE como sendo as “Características da eletricidade num determinado ponto do sistema elétrico, comparativamente a um conjunto de parâmetros técnicos de referência” [4, pag.6].

Na atualidade existe uma enorme preocupação com a qualidade dos sistemas que utilizamos. O sistema elétrico é um dos sistemas mais importantes, pois tem a função de interagir com biliões de cargas todos os dias. Sendo assim, uma pobre qualidade deste sistema pode levar a anomalias no funcionamento dessas cargas podendo, por vezes, danificá-las. Por este motivo existem estudos que identificam diversos problemas de QEE, exibindo também possíveis soluções.

A norma europeia EN 50160, produzida pela entidade reguladora CENELEC (*European Committee for Electrotechnical Standardization*), é responsável por quantificar os limites em todos os problemas da qualidade da energia e por definir os valores nominais da tensão e da frequência por toda a Europa. Esta norma sofre algumas alterações para se adaptar a cada país, e como tal esta é renomeada. No caso particular de Portugal esta adaptação é conhecida por NP EN 50160.

No seguimento da norma NP EN 50160 e com o atendimento pormenorizado de todos os problemas da QEE que surgem na entrega e na distribuição de energia elétrica, verificam-se alguns subgrupos de problemas, como se pode constatar na Tabela 2.1. Desta forma os problemas podem ser avaliados tanto a nível individual como por um coletivo que reúne todas as semelhanças deste tipo de problemas.

Tabela 2.1 - Problemas de Qualidade de Energia Elétrica [5].

Problemas de Qualidade de Energia Elétrica	
Curta Duração	Caídas de Tensão
	Sobretensões Momentâneas
	Interrupções Momentâneas
Longa duração	Subtensões
	Sobretensões
	Interrupções
Transitórios	Impulsivos (Surtos de tensão)
	Oscilatórios
Distorção da Forma de Onda	Harmónicas
	Inter-Harmónicas
	Micro-Cortes
	Ruído
	<i>Offset DC</i>
Outros	Tremulação (<i>Flicker</i>)
	Variação de Frequência
	Desequilíbrios de Fases

Posto isto, os subcapítulos seguintes contêm uma breve descrição dos problemas de QEE acima tabelados. Esta descrição tem o intuito de oferecer uma abrangente gama de conceitos e demonstrar graficamente o comportamento das tensões e correntes nas linhas quando estas se deparam com algum destes acontecimentos. Por outro lado, são apresentados também um conjunto de causas, consequências e algumas prováveis soluções para cada tipo de problema em questão.

2.2 Problemas de QEE: Curta Duração

Existem problemas de QEE que são imperceptíveis ao olho humano. Contudo, o avanço das tecnologias e o aparecimento de sistemas de monitorização que gravam em memória acontecimentos rápidos com que as linhas eléctricas se deparam, foi possível decifrar alguns destes problemas. Estes eventos, que têm duração entre 10 milissegundos e 1 minuto são denominados por eventos momentâneos ou de curta duração [5]. Dentro desta temática é possível identificar três problemas reais, sendo estes as caídas de tensão, as sobretensões

momentâneas e as interrupções momentâneas. De seguida, serão apresentados em pormenor os eventos de QEE deste carácter.

2.2.1 Cavas de Tensão

As cavas de tensão, ou *sag*, na literatura inglesa, descrevem uma subtensão momentânea, que segundo a norma NP EN 50160, são anomalias nos sistemas elétricos que podem ter a duração de 10 milissegundos (meio ciclo da rede) a 1 minuto, podendo ainda a tensão variar de 90% a 1% da tensão eficaz [5].

Normalmente, este problema da rede elétrica tem duração inferior a 1 segundo e severidade inferior a 60% da tensão nominal, sendo que na sua grande maioria ocorre com amplitude inferiores a 15% da tensão nominal. O valor da cava de tensão é sempre apresentando em percentagem, fazendo a relação entre o valor eficaz da tensão no momento da subtensão com o valor eficaz da tensão nominal [5][6].

Na Figura 2.1 é apresentada uma cava de tensão, com duração de 100 milissegundos e com uma atenuação de tensão de 17%. Este problema de QEE deve-se significativamente ao facto da entrada de grandes cargas nos sistemas elétricos, como é o exemplo a entrada em funcionamento de um forno a arco.

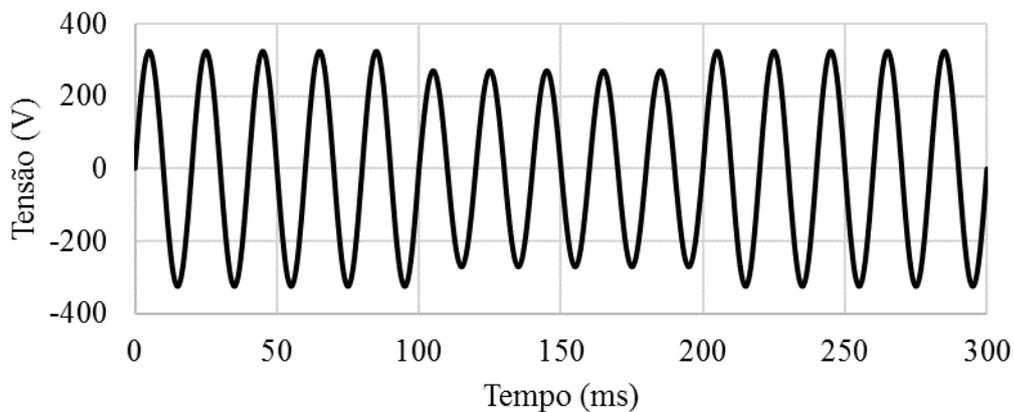


Figura 2.1 - Problemas de QEE de curta duração: cava de tensão.

2.2.2 Sobretensões Momentâneas

As sobretensões momentâneas, ou *swell*, na literatura inglesa, são aumentos momentâneos da tensão à frequência da rede, no caso de Portugal 50 Hz. A par da norma NP EN 50160, estes acontecem devido à saída de grandes cargas do sistema elétrico. Este evento ainda pode dever-se ao mau dimensionamento dos sistemas elétricos ou dos transformadores [7].

De forma a ser considerada uma sobretensão momentânea é necessário que esta exceda os 10% da tensão nominal de alimentação e que a sua duração seja superior a 1/2 ciclo da rede e inferior a 1 minuto. Se estas características forem comprovadas encontra-se perante uma sobretensão momentânea [5].

Na Figura 2.2 é apresentado um exemplo de uma sobretensão momentânea, conclui-se que a sobretensão tem um intervalo de 100 milissegundos e esta eleva a tensão cerca de 18% acima da tensão nominal, ou seja, a tensão passa a possuir um valor eficaz superior a 270 V.

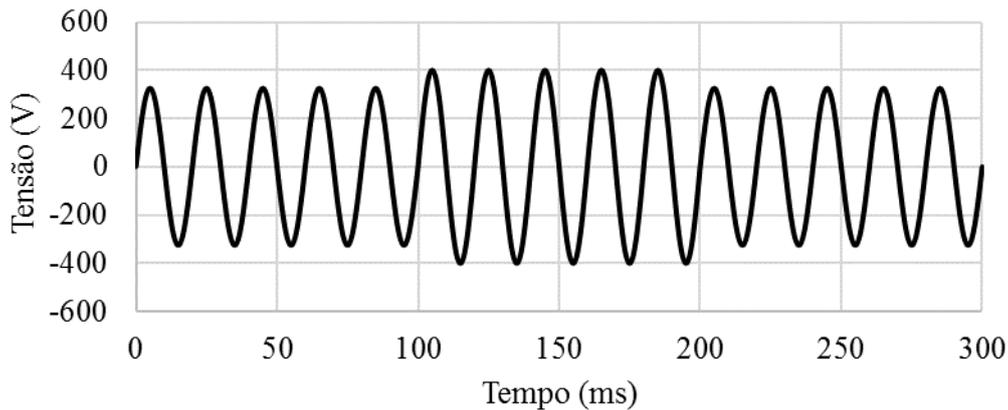


Figura 2.2 - Problemas de QEE de curta duração: sobretensão momentânea.

2.2.3 Interrupções Momentâneas

Existem problemas associados as linhas elétricas que são realmente indesejados, como é o caso das interrupções no fornecimento de energia elétrica, pois estas causam demasiados transtornos à população, quer a nível industrial como doméstico. Para colmatar este problema as empresas podem utilizar UPS (*Uninterruptible Power Supply*), de forma a prevenirem-se contra esses acontecimentos nas linhas elétricas, diminuindo os efeitos deste problema de QEE [8].

As interrupções momentâneas, denominadas vulgarmente como faltas de energia elétrica, devem-se muitas vezes ao acionamento das proteções contra curto-circuito, sobretudo os disjuntores, visto que as instalações elétricas podem estar protegidas com disjuntores que possuam rearme automático, interrompendo assim a passagem de corrente elétrica a partir daquele troço da rede elétrica.

Segundo a norma NP EN 50160, estas interrupções têm de ser inferiores a 1 minuto e superiores 10 milissegundos para serem denominadas por interrupções momentâneas [5]. Na

Figura 2.3 pode-se constatar um exemplo de interrupção momentânea com a duração de 100 milissegundos, ou seja, 5 ciclos da rede elétrica em questão.

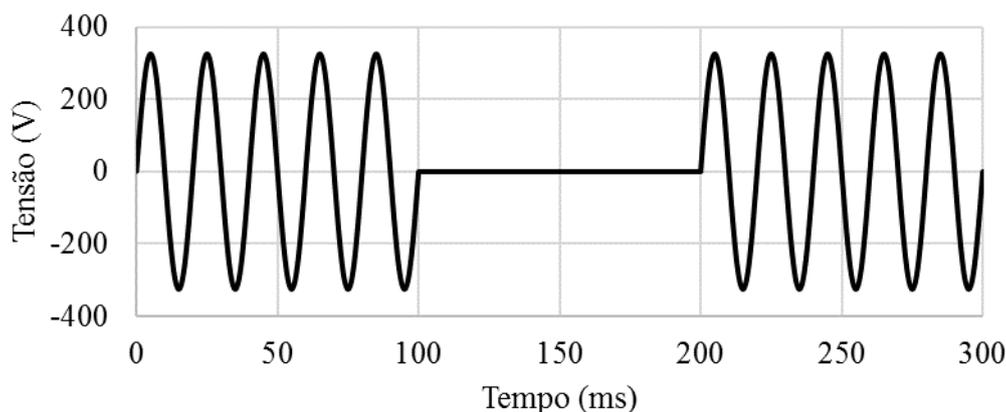


Figura 2.3 - Problemas de QEE de curta duração: interrupção momentânea.

2.3 Problemas de QEE: Longa Duração

Como se pode constatar na Tabela 2.1, os problemas de QEE dividem-se em várias subcategorias, nesta secção são abordados os problemas de longa duração. Estes eventos são mais preocupantes, que os que foram apresentados anteriormente, pois podem danificar algumas cargas mais sensíveis do sistema elétrico.

Generalizando, se uma carga que está a ser alimentada por uma tensão superior do que aquela que foi dimensionada por um período de tempo elevado, a vida útil dessa mesma carga diminui significativamente. Por outro lado, se alguma carga estiver a ser alimentada por uma tensão inferior à do seu dimensionamento por um longo período de tempo, esta irá provocar uma deficiência no seu funcionamento.

Nos dias de hoje, a maioria dos processos industriais são automatizados, por este motivo é impensável, para os engenheiros e para os dirigentes destas indústrias, uma falha de energia elétrica por um longo período ou mesmo uma baixa qualidade na entrega da energia elétrica.

Por estes motivos, os problemas de QEE de longa duração são muito preocupantes e bastante perturbadores para as indústrias. Nos próximos pontos serão identificados e caracterizados alguns problemas de QEE de longa duração, sendo estes as subtensões, sobretensões e as interrupções de longa duração.

2.3.1 Subtensões

À semelhança do que foi referido quanto às cavas de tensão, as subtensões acontecem quando a tensão baixa do valor nominal por períodos de tempo consideravelmente grandes, superiores a 1 minuto. Estes problemas ocorrem nas linhas elétricas quando estas foram mal dimensionadas, fazendo com que aumentem as perdas nos condutores e, conseqüentemente, que a tensão de alimentação seja mais baixa do que a tensão nominal. Como soluções para este tipo de problemas aparecem o redimensionamento de transformadores ou o simples ajuste. Este problema também pode ser resolvido com recursos a UPS ou a outros sistemas que controlam a tensão de alimentação. Desta forma é possível reduzir os impactos de uma subtensão [5].

2.3.2 Sobretensões

É considerada sobretensão uma tensão mais de 10% acima do valor nominal da tensão por um período de tempo superior a 3 minutos [5]. Normalmente este é um problema de QEE relativamente grave, pois pode reduzir significativamente o tempo de vida útil das cargas mais sensíveis, dado que estas foram dimensionadas para operar a níveis de tensão muito próximos da tensão nominal da rede. Assim uma sobretensão de níveis elevados pode mesmo danificá-las imediatamente.

Este problema possui um grupo de causas conhecidas, sendo estas o sobredimensionamento de transformadores elétricos, o desligar de cargas que consomem grande quantidade de energia elétrica, ou transformadores de alimentação do ramal elétrico mal regulados. Por vezes, para a regulação da tensão para os valores nominais é necessário ajustar os transformadores.

2.3.3 Interrupções

As interrupções, caracterizadas por falhas de energia elétrica por um longo período de tempo, são o problema mais assustador, tanto a nível industrial como doméstico, pois inibem o funcionamento de todas as cargas que estão diretamente dependentes de alimentação elétrica.

Contudo, em hospitais e na indústria existem processos que não podem ser interrompidos, sendo para isso utilizados sistemas auxiliares de alimentação, como geradores e UPS. Porém, se a interrupção for bastante longa o acoplamento de UPS pode não ser suficiente, visto que esta alternativa é limitada pela quantidade de carga que as baterias possuem. Neste sentido,

os hospitais possuem, normalmente, geradores de emergência de forma a suportar cargas prioritárias que não podem ser desligadas [9] [10].

A norma NP EN 50160 classifica, este tipo de interrupções de fornecimento de energia elétrica como interrupções previstas e como interrupções acidentais. Se estas forem previamente informadas pela distribuidora de energia elétrica, são classificadas como previstas. Normalmente, estas interrupções são sobretudo para manutenção das linhas elétricas [5].

As interrupções acidentais têm de ter uma duração superior a 3 minutos, devendo-se em grande parte a erros humanos e a fatores ambientais, tais como quedas de árvores sobre os condutores elétricos, provocando assim ruturas nos condutores elétricos, ou descargas atmosféricas, que podem por vezes danificar severamente as linhas elétricas. Por outro lado, o acionamento de sistemas de proteção pode também provocar uma interrupção de longa duração deste género, como é exemplo a fundição de um fusível [5].

2.4 Problemas de QEE: Transitórios

Os transitórios nas tensões, intitulados na língua inglesa por *voltage transient*, são fenómenos muito rápidos que ocorrem nas linhas elétricas. A maioria destes eventos dura apenas alguns microssegundos, dificultando assim a sua correção e mesmo a sua perceção por parte dos sistemas de monitorização de QEE.

Neste subcapítulo, são apresentados e caracterizados dois exemplos bastante comuns de transitórios, sendo estes os transitórios impulsivos, ou *voltage spikes* na literatura inglesa e os transitórios oscilatórios. É relevante saber que estes acontecimentos são fortemente amortecidos pela impedância da rede elétrica.

2.4.1 Transitórios impulsivos (Surtos de Tensão)

Os transitórios impulsivos, ou vulgarmente denominados por surtos de tensão, são eventos normalmente muito rápidos. Mais especificamente acontecem em intervalos na ordem dos microssegundos [5].

A sua velocidade e a sua intensidade são os principais motivos de preocupação, pois dificulta bastante a sua perceção por sistemas de vigilância das redes elétricas. Por consequência, estas duas características podem não fazer atuar os sistemas de proteção, causando danos irreparáveis em algumas cargas [11].

Estes eventos devem-se maioritariamente às condições atmosféricas adversas, mais especificamente às descargas atmosféricas. Quando estas acontecem sobre as linhas elétricas provocam um pico de tensão na ordem das centenas de volts e por vezes podendo mesmo chegar aos milhares de volts [11].

Na Figura 2.4 observa-se um impulso transitório que atinge as centenas de volts, com a duração de alguns microssegundos, mas com a capacidade danificar algumas canalizações, transformadores ou cargas do sistema elétrico adjacente a esta linha elétrica.

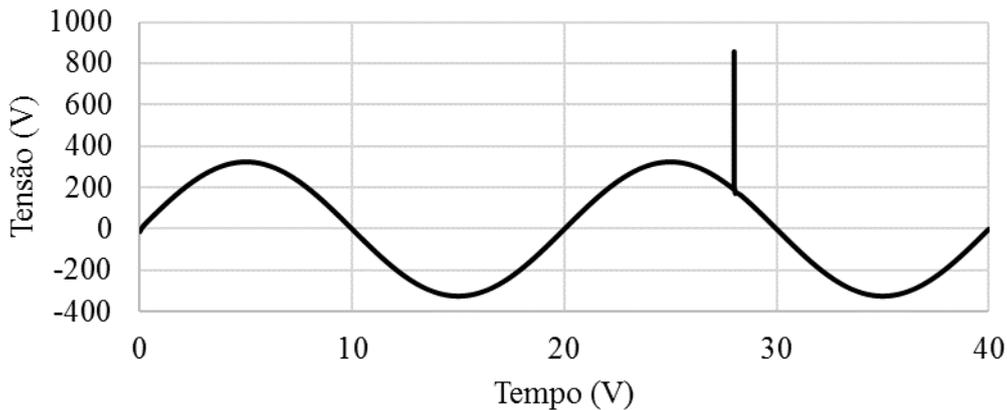


Figura 2.4 - Problemas de QEE transitórios: surto de tensão.

2.4.2 Transitórios Oscilatórios

Os transitórios oscilatórios são picos de tensão fortemente amortecidos pelas linhas de transporte de energia elétrica. Estes transitórios são mais longos que os impulsivos, como o próprio nome indica, mas não demoram muito além de alguns milissegundos. Na maioria das vezes, estes são provocados por a entrada de bancos de condensadores em funcionamento, para a correção do fator de potência, e ainda podem dever-se a descargas atmosféricas [12].

Segundo a norma NP EN 50160, este fenómeno pode ser classificado como oscilação de baixa, média ou alta frequência dependendo da frequência de oscilação. Se a frequência for menor do que 5 kHz trata-se de uma oscilação de baixa frequência. Para ser uma oscilação de média frequência o valor da frequência tem de estar compreendido entre 5 kHz e 500 kHz. Por fim, se a frequência possuir uma gama de valores entre 500 kHz e 5 MHz trata-se de uma oscilação de alta frequência [5].

De forma a perceber qual é a frequência do transitório, é necessário calcular a frequência de ressonância da instalação elétrica. Para isso é imprescindível saber o valor da indutância (L) e o valor da capacitância (C) do sistema em questão [13]. Consta-se que:

$$X_C = \frac{1}{2 \pi f C} \quad 2.1$$

E,

$$X_L = 2 \pi f L \quad 2.2$$

Sabe-se ainda que a frequência de ressonância acontece quando a reatância capacitiva (X_C) é igual à reatância indutiva (X_L), posto isto:

$$X_C = X_L \quad 2.3$$

Substituindo na equação 2.3 as equações 2.1 e 2.2 obtém-se:

$$\frac{1}{2 \pi f C} = 2 \pi f L \quad 2.4$$

Sabemos ainda que a velocidade angular (ω) é dada por,

$$\omega = 2 \pi f \quad 2.5$$

Substituindo a equação 2.5 na equação 2.4, obtém-se:

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L \quad 2.6$$

Efetuada os cálculos necessários de simplificação, tem-se:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L C}} \quad 2.7$$

Se for pretendido o valor da frequência em Hz, pode-se voltar a substituir a equação 2.5, agora na equação 2.7. Com todos os cálculos de simplificação obtém-se:

$$f = \frac{1}{2 \pi} \sqrt{\frac{1}{L C}} \quad 2.8$$

Posto isto, estão reunidas todas as condições favoráveis para calcular a frequência de oscilação. Na Figura 2.5 está representado um transitório oscilatório, que acontece devido à entrada de um banco de condensadores no sistema elétrico. Este dá-se no instante 25 milissegundos e demora quase 5 milissegundos até ser totalmente amortecido. O transitório que está representado trata-se de um oscilatório de baixa frequência ($f < 5$ kHz), tendo uma frequência de 2,5 kHz.

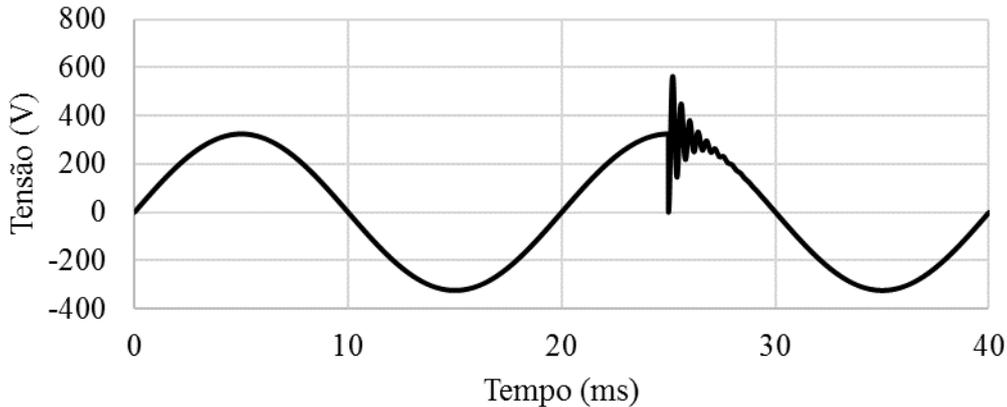


Figura 2.5 - Problemas de QEE transitórios: transitório oscilatório

2.5 Problemas de QEE: Distorção da Forma de Onda

Este género de eventos provoca distorção na forma de onda que, em condições ideais, seria uma onda perfeitamente sinusoidal. A adição destes problemas, quer na tensão quer nas correntes, faz com que as formas de onda destas sejam não sinusoidais.

Os conversores CA-CC (corrente alternada para corrente contínua), também conhecidos como retificadores, são uns dos principais responsáveis por estes problemas. A par dos retificadores estão os Controladores Eletrónicos de Velocidade, na literatura inglesa conhecidos como ESC (*Electronic Speed Controller*), que provocam bastante distorção na forma de onda [14].

2.5.1 Harmónicas

A distorção harmónica trata-se de um dos problemas mais citados no quotidiano de QEE. A norma NP EN 50160 tem especial atenção ao conteúdo harmónico que existe nas tensões. A Tabela 2.2 descreve a tensão relativa que cada harmónico pode conter, este valor refere-se ao valor eficaz. Por exemplo, em Portugal a tensão eficaz a baixa tensão é de 230 V, isto significa que o 5º harmónico não pode ter um valor superior a 6% de 230 V ($< 13,8$ V) [5].

Para além das harmónicas serem caracterizadas como harmónicas pares e harmónicas ímpares, como se verifica na Tabela 2.2, podem ainda, ser classificadas como harmónicas de sequência zero, sequência positiva ou sequência negativa (Tabela 2.3), sendo que todas elas trazem problemas para o sistema eléctrico. Por exemplo, as harmónicas ímpares podem provocar um défice no rendimento das cargas. É de salientar que o limite máximo para as tensões harmónicas, imposto pela norma NP EN 50160, é de 8%.

Tabela 2.2 - Valores das tensões harmónicas nos pontos de entrega de tensão até á ordem 25 [5].

Taxa Individual de harmónicas para BT e MT					
Harmónicas Ímpares				Harmónicas Pares	
Não múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem do harmónico	Tensão relativa (%)	Ordem do harmónico	Tensão relativa (%)	Ordem do harmónico	Tensão relativa (%)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

NOTA: Os valores correspondentes às harmónicas de ordem superior a 25, por serem geralmente baixos e muito imprevisíveis (devido aos efeitos de ressonância), não são indicados nesta tabela.

Como seria de esperar, existem várias classificações para as harmónicas tanto na tensão como na corrente. As harmónicas de terceira ordem bem como os seus múltiplos inteiros são agrupadas em harmónicas de sequência zero. Estas harmónicas representam um enorme problema, pois estas harmónicas de corrente são adicionadas à corrente no neutro, provocando assim, por vezes, correntes muito elevadas no condutor de neutro. Se o dimensionamento do neutro não for feita com uma margem elevada e a instalação eléctrica possuir elevada percentagem de harmónicas de sequência zero, isso pode levar ao mau funcionamento dos transformadores e por vezes pode mesmo danificar o isolamento dos condutores de neutro. Por este motivo as normas de QEE são bastante severas com eles [14].

As harmónicas podem provocar alguns problemas de funcionamento de algumas cargas, mas, por outro lado, podem provocar problemas também a nível das canalizações. Por exemplo, como foi referido anteriormente, as harmónicas de sequência zero podem provocar aquecimento do condutor de neutro.

Tabela 2.3 - Sequência das harmónicas [15].

Frequência (Hz)	Ordem h	Sequência
50	Fundamental	Positiva
100	2	Negativa
150	3	Zero
200	4	Positiva
250	5	Negativa
300	6	Zero
350	7	Positiva

Posto isto, as harmónicas, tanto de tensão como de corrente, podem ser avaliadas individualmente ou globalmente. A avaliação individual das harmónicas rege-se segundo a verificação da amplitude da harmónica em relação à amplitude na fundamental, ou seja, permite saber se o valor percentual dessa harmónica está no intervalo, ou não, dos valores tabelados na Tabela 2.2.

Já a avaliação global das harmónicas, que é mais conhecida por Distorção Harmónica Total, (THD - *Total Harmonic Distortion*), este pode ser calculado com base na equação 2.9, em que H é o número total de harmónicas e h é o número da harmónica [14] [15].

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H U_h^2}}{U_1} 100 \quad 2.9$$

Na Figura 2.6 é apresentado um exemplo da entrada de vários harmónicos em tempos diferentes, que serve para averiguar a distorção da forma de onda. É de máxima importância referir que para esta simulação não foram respeitados os valores da Tabela 2.2. Posto isto, para a terceira harmónica foi dado o valor de 40 V, para quinta tem o valor de 20 V e a sétima harmónica 10 V. Esta figura começa com uma onda totalmente sinusoidal em que após 20 ms é adicionado a terceira harmónica, aos 40 ms é adicionado ao sinal anterior a quinta harmónica e aos 60 ms é adicionado ao sinal a sétima harmónica.

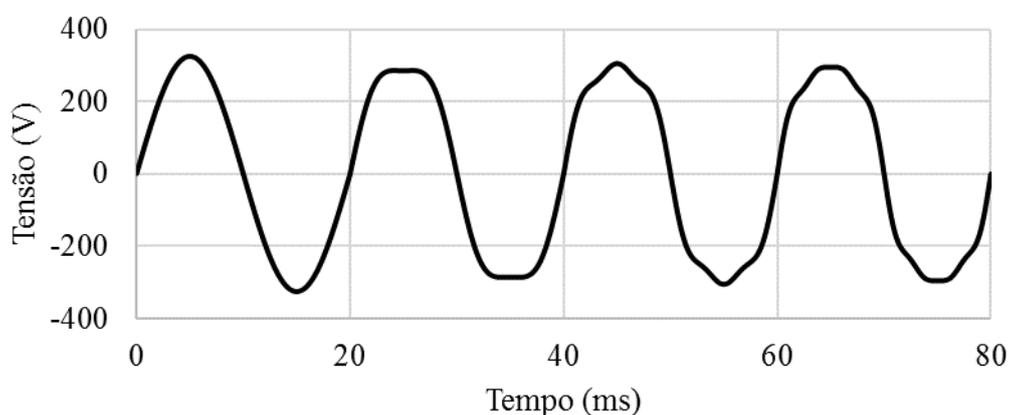


Figura 2.6 - Problemas de QEE de distorção da forma de onda: harmônicas.

2.5.2 Inter-Harmônicas

No quotidiano dos problemas de QEE, as inter-harmônicas são consideradas uma nova temática, pois estes têm aumentado nos últimos anos. Até ao início do século XXI, pensava-se que o fenómeno não passava do facto das cargas necessitarem de certas quantidades de energia reativa. No entanto, com todos os estudos que foram feitos neste âmbito, descobriu-se que algumas cargas quando entram em funcionamento provocam inter-harmônicas na rede elétrica [16].

Segundo a norma NP EN 50160, a tensão inter-harmônica é uma tensão sinusoidal cuja frequência não é múltipla inteira da frequência da fundamental. Este é um problema que, a par com as harmônicas, é uma consequência direta do avanço da tecnologia das cargas. Este dilema foi intensificado devido ao aumento da utilização de conversores de frequência, de motores de indução e de todas as cargas que não atuam de forma síncrona com a fundamental da frequência do sistema elétrico [5][16][17].

Na Figura 2.7 encontra-se um bom exemplo de tensão inter-harmônica, visto que esta mostra os efeitos na rede elétrica da adição de um sinal cuja a frequência não é múltipla da frequência fundamental do sinal original, ou seja, da onda sinusoidal a 50 Hz. Nesta figura verifica-se que até aos 100 ms encontra-se uma onda sinusoidal com a frequência da rede, e a partir desse instante é somado uma componente inter-harmônica de 75 Hz. Por outro lado, averigua-se também, dada a soma dos dois sinais sinusoidais de frequências não múltiplas, que existe uma tremulação, esta possuindo uma frequência de 25 Hz.

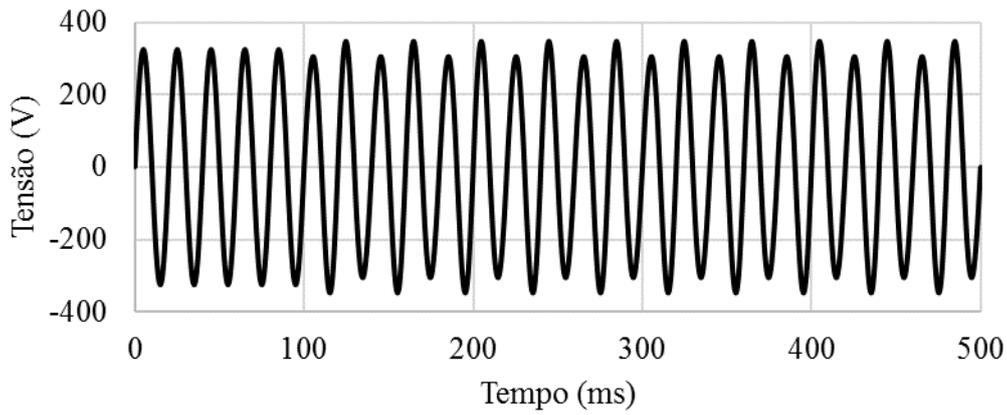


Figura 2.7 - Problemas de QEE de distorção da forma de onda: inter-harmônicas.

2.5.3 Micro-Cortes

Os micro-cortes, ou *notches*, na literatura inglesa, consistem em pequenos cortes na forma de onda da tensão, deformando assim a onda sinusoidal da tensão. Por isso este problema associado à QEE é classificado como um problema de Distorção da Forma da Onda.

Normalmente, estes são periódicos, pois são causados por curto-circuitos provocados pela comutação dos semicondutores de potência presentes nos conversores de eletrônica de potência. Para prevenir este problema, ou pelo menos reduzir a sua interferência no sistema elétrico, são utilizados filtros de interferência eletromagnética [18][19].

Em suma, com o crescente acoplamento de conversores de eletrônica de potência à rede elétrica, as formas de onda das tensões e das correntes sofrem algumas alterações, uma dessas alterações é o aparecimento de micro-cortes nas tensões. Na Figura 2.8, encontra-se uma forma de onda da tensão que possui ligeiros cortes periódicos. Estes surgem com uma frequência de 300 Hz, distorcendo assim a forma de onda que, em condições ideais, seria uma onda perfeitamente sinusoidal.

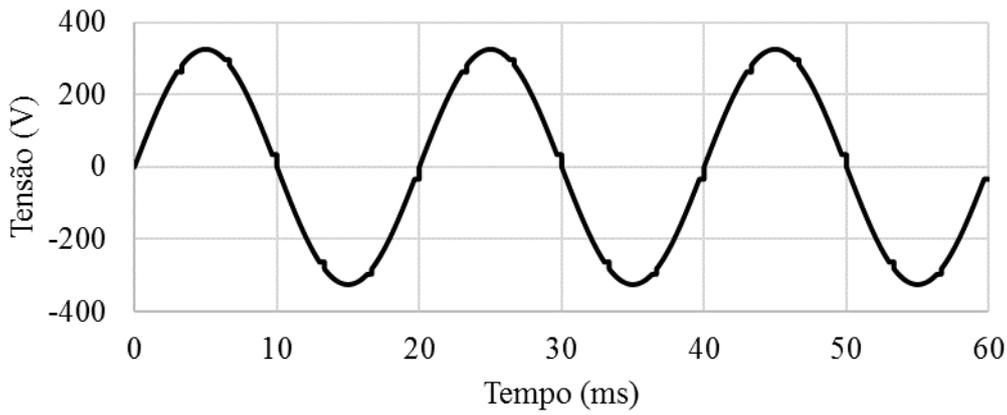


Figura 2.8 - Problemas de QEE de distorção da forma de onda: micro-cortes.

2.5.4 Interferência Eletromagnética

A interferência eletromagnética, tal como as harmónicas, pode ser um sinal com frequência múltipla inteira da frequência da rede. Para ser considerada interferência eletromagnética este sinal que é adicionado a rede tem de possuir uma frequência superior à frequência da quadragésima harmónica, ou seja, o sinal de ruído tem de possuir uma frequência mínima de 2 kHz [5].

As interferências eletromagnéticas, ou EMI (*Electromagnetic Interference*), na literatura inglesa, podem ser produzidas por vários fatores, sendo estes separados em dois grupos, causas humanas e causas naturais. Seguidamente são descritos em pormenor estes dois grupos de causas deste problema de QEE.

Com o decorrer do tempo tem havido uma grande preocupação com o consumo de energia elétrica, e a inserção de cargas não-lineares no sistema elétrica tem sido cada vez mais uma realidade. Estas cargas são constituídas, entre outras coisas, por conversores de potência que comutam os seus semicondutores a frequências muito elevadas, gerando assim ruído de alta frequência. A comutação dos semicondutores a grandes frequências é uma das principais causas de interferência eletromagnética nos sistemas elétricos, mas não é a única. Por exemplo, o acionamento de cargas indutivo-resistivas pode provocar este problema, entre outras causas [20][21].

Por vezes, a Mãe Natureza também é responsável por alguns problemas de QEE. Deste modo, as interferências eletromagnéticas não são exceção, pois estas podem ser provocadas por fatores ambientais adversos. As descargas atmosféricas, ou *lightning*, na literatura inglesa, podem provocar ruído de alta frequência nas linhas elétricas. Do mesmo modo, todas as

descargas electrostáticas, quer seja entre humanos e máquinas ou entre máquina e máquina, provocam este tipo de problemas [22].

Na Figura 2.9 debruça-se sobre a entrada de uma ressonância no sistema elétrico, que acontece aos 20 ms e propaga-se até aos 60 ms, ou seja, dois ciclos da rede elétrica. Este sinal aparentemente inofensivo pode provocar defeitos nos processos de fabrico, consequentemente danificando o produto final, podendo também interferir significativamente nos sistemas de controlo. Para a eliminação deste problema, é necessário o acoplamento de filtros de interferência eletromagnética, ou filtros passa-baixo, nas linhas de distribuição de energia elétrica [19].

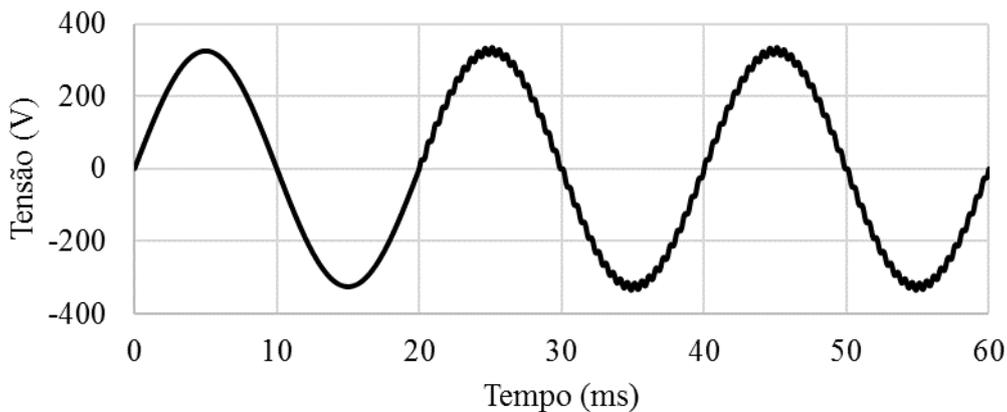


Figura 2.9 - Problemas de QEE de distorção da forma de onda: interferência eletromagnética.

2.5.5 Offset DC

O *Offset DC* é a soma de uma componente CC, ou, na literatura inglesa, DC (*Direct Current*), ao sinal sinusoidal. Deste modo, o *Offset DC* provoca uma ligeira deformação de onda. Este tipo de deformação pode passar um pouco despercebido, visto que a onda continua sinusoidal, mas possuindo valor médio diferente de zero. Este pode ser considerado um problema de QEE muito grave.

Por norma, este problema de QEE é causado pelos retificadores de meia onda que são inseridos em algumas cargas do sistema elétrico. Por outro lado, esta anomalia nos sistemas elétricos pode ser também provocada por distúrbios geomagnéticos, normalmente denominados por GIC (*Geomagnetically Induced Current*), afetando assim os condutores do sistema elétrico e, por vezes, introduzindo *Offset DC* nas correntes do sistema elétrico [23][24].

Consequentemente, o *Offset DC* provoca vários problemas a nível da distribuição de energia elétrica, tais como saturação dos transformadores ou produção de harmónicas pares para além das harmónicas ímpares que já possui. Pode levar ainda a um aquecimento adicional em múltiplos dispositivos, deste modo levando à diminuição do tempo de vida de alguns dos seus componentes, tais como transformadores e outros componentes eletromagnéticos [12][23].

Concluindo, o *Offset DC* é um problema de QEE com grande importância, pois este pode danificar os componentes do sistema elétrico, como foi referido anteriormente. De forma a visualizar a deformação da onda devido a este problema é apresentada na Figura 2.10, que representa dois ciclos da rede elétrica, em que o segundo ciclo é poluído com *Offset DC*.

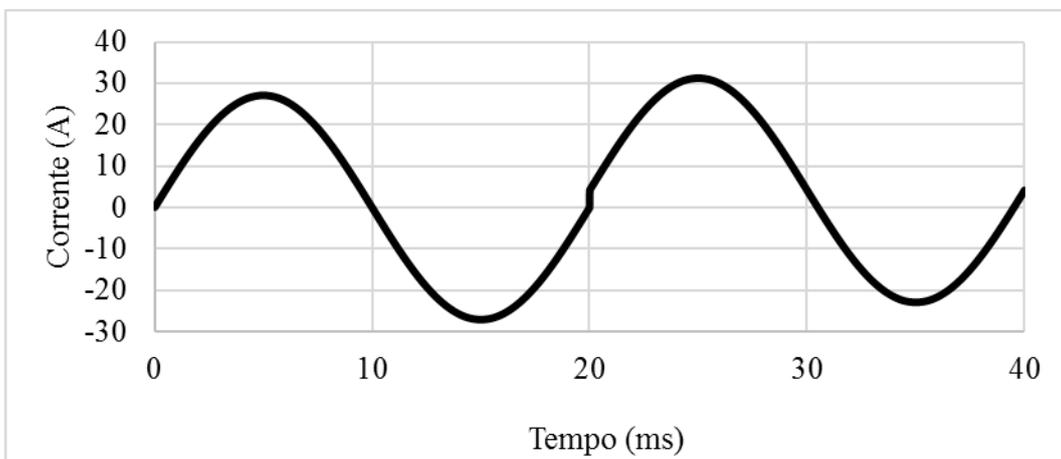


Figura 2.10 - Problemas de QEE de distorção da forma de onda: *offset DC*.

2.6 Tremulação (*Flicker*)

A tremulação, mais conhecido pelo termo em inglês *flicker*, está normalmente associada a um efeito visual provocado pela variação da luminância no tempo. Este efeito, quando aplicado a um sistema elétrico, como seria de esperar, faz com que a luminância das lâmpadas esteja a variar no tempo. Este efeito luminoso é provocado pela variação do valor eficaz da tensão ao longo do tempo.

Este problema de QEE por vezes pode ser confundido com o problema de inter-harmónicas, devido às suas semelhanças, como já foi referido anteriormente. Mas ao analisar, este problema tem um leque bastante diferente de causas. A queda do valor eficaz da tensão na rede é provocada pela queda de tensão nas impedâncias do sistema elétrico. Isto acontece devido a variações muito grandes no consumo de corrente elétrica. Os maiores causadores deste efeito são os fornos a arco elétrico, os cicloconvertidores, as variações de velocidades

dos motores, entre outros. De forma a estudar um *flicker* as entidades muniram-se de duas variantes desta anomalia, a variante de pequeno termo P_{st} e a variante de longo termo P_{lt} [25][26].

Posto isto, a tremulação é considerada um dos maiores problemas a nível da flutuação da tensão, visto que, este problema não tem só efeitos negativos no sistema elétrico, mas possui efeitos bastante negativos nos seres humanos. A nível empresarial, a tremulação é bastante indesejável, pois pode gerar problemas como fotossensibilidade, fadiga e baixo rendimentos nos operadores. Por outro lado, os efeitos deste problema no sistema elétrico também são consideráveis, visto que este pode provocar falhas de operações devido ao desarme de relés e provocar problemas em cargas mais sensíveis à variação da tensão, como por exemplo os equipamentos médicos [26].

Em suma, a tremulação surge normalmente com uma frequência fixa menor que 25 Hz e com um efeito luminoso associado. Na Figura 2.11 é apresentado a forma de onda de uma tremulação com uma frequência de 5 Hz.

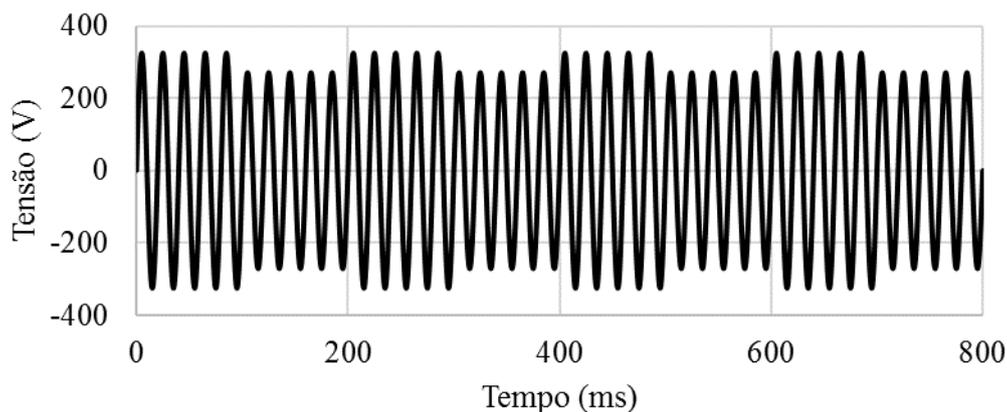


Figura 2.11 - Problemas de QEE: Tremulação.

2.7 Variação de Frequência

No quotidiano de QEE, entende-se por variação da frequência qualquer desvio da frequência fundamental do sistema elétrico. Na Europa a frequência fundamental da rede elétrica é de 50 Hz. Segundo a norma NP EN 50160, a empresa transportadora de energia elétrica tem de garantir que a frequência da tensão da rede possui durante 99,5% do tempo ao longo de uma semana o valor apresentado na expressão 2.10:

$$50 \text{ Hz} \pm 1\% \quad 2.10$$

A concessionária de energia necessita, ainda, garantir que a frequência da tensão da rede respeite o limite apresentado na expressão 2.11 durante 100% do tempo [5].

$$50 \text{ Hz } \left(\pm \frac{4}{6} \right) \% \quad 2.11$$

Nos dias de hoje, com a inserção na rede elétrica de energia proveniente de fontes renováveis, nomeadamente da energia solar e da energia eólica, torna-se mais difícil o controlo da frequência do sistema elétrico. Mas mesmo assim a rede elétrica é essencialmente alimentada por geradores elétricos, sendo que a velocidade destes é controlada para que a frequência se mantenha estável [27].

Por vezes, em países que possuem muita indústria, pode haver uma sobrecarga do sistema elétrico. Isto significa que a potência instantânea consumida pode variar muito significativamente com a entrada e saída de grandes cargas do sistema. Consequentemente, torna-se bastante difícil para as concessionárias de energia elétrica garantir tanto os limites das variações de tensão como os limites propostos para as variações de frequência. No entanto, as variações de frequência muito altas são bastante raras [12].

Em suma, este problema de QEE é um dos mais importantes, por isso, existe uma maior severidade com as concessionárias de energia elétrica sobre os limites destas variações. No entanto, as variações de frequência fundamental estão eminentes, mas em níveis controlados, deste modo, não resultam muitos problemas nas cargas devido à variação da frequência.

2.8 Desequilíbrio de Fases

Os sistemas trifásicos, no momento de produção de energia elétrica, são dimensionados para que o valor eficaz das tensões trifásicas seja igual entre si e que estas estejam desfasadas umas das outras 120° . Se se verificar estas mesmas condições junto aos clientes da energia elétrica pode-se dizer que as tensões estão perfeitamente balanceadas, caso contrário depara-se com um problema de QEE designado por desequilíbrio de fases [28].

Os desequilíbrios de tensão, ou *voltage unbalances*, na literatura inglesa, significam que o sistema trifásico não possui a tensão das suas fases sincronizada, ou seja, as tensões do sistema têm valores eficazes diferentes e os desfasamentos não correspondem a 120° entre si. Este problema de QEE é avaliado percentualmente através do VUF (*Voltage Unbalance Factor*). Este fator é expresso pela relação entre a componente de sequência negativa e a componente de sequência positiva da tensão, como se pode comprovar na equação 2.12.

$$\%VUF = \frac{V_n}{V_p} 100 \quad 2.12$$

Para que seja possível calcular o VUF é estritamente necessário saber quais são os valores das componentes de sequência negativa e de sequência positiva. Os passos necessários para o cálculo destas duas componentes são apresentados nas equações 2.13 e 2.14.

$$V_n = \frac{V_{ab} + a^2 V_{bc} + a V_{ca}}{3} \quad 2.13$$

$$V_p = \frac{V_{ab} + a V_{bc} + a^2 V_{ca}}{3} \quad 2.14$$

Sabendo ainda que:

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad 2.15$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ \quad 2.16$$

Posto isto, estão reunidas todas as condições para ser calculado o desequilíbrio das tensões do sistema trifásico [29].

É de salientar que existem ainda mais duas definições que nos permite quantificar este problema que são a LVUR (*Line Voltage Unbalance Rate*) e a PVUR (*Phase Voltage Unbalance Rate*). Estas duas definições são facultadas, respetivamente, pela NEMA (*National Equipment Manufacturer's Association*) e pelo IEEE [29]. Na Figura 2.1 é apresentado um exemplo de desequilíbrio de fases. Neste exemplo verifica-se apenas uma variação de amplitude de fases, mantendo-se, deste modo, o defasamento entre cada fase de 120° .

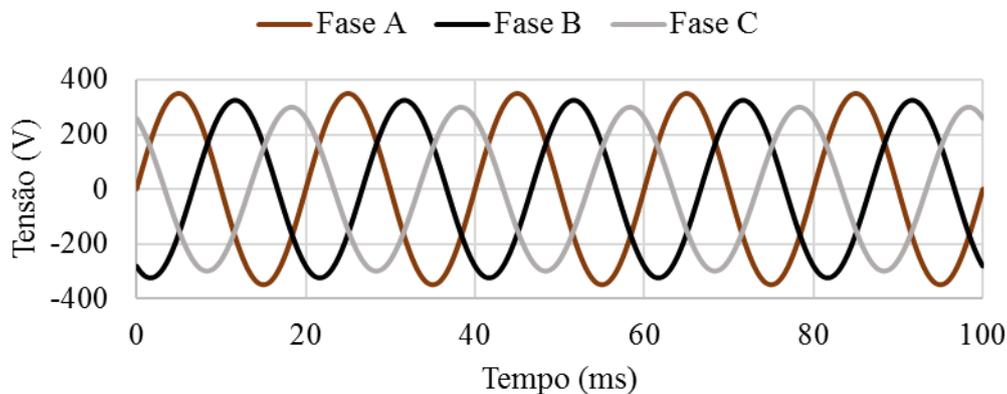


Figura 2.12 - Problemas de QEE: desequilíbrios de fases.

2.9 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas algumas definições de QEE facultadas por duas entidades muito importantes neste ramo o IEEE e a IEC. Foram ainda apresentados os principais problemas de QEE fazendo se acompanhar por um conjunto de causas, consequências e possíveis soluções. Alguns problemas de QEE foram ainda complementados com um gráfico de forma a elucidar sobre as suas características. Ao longo deste capítulo averigua-se que existem vários tipos de problemas de QEE, mas que estes se podem agrupar, segundo as suas características, em pequenos grupos de forma a ser mais fácil o seu estudo.

Capítulo 3

Sistemas de Monitorização de Qualidade de Energia Elétrica

3.1 Introdução

A Qualidade de Energia Elétrica (QEE) é uma enorme preocupação nos sistemas de transporte de energia, visto que, uma baixa qualidade pode levar ao mau funcionamento das suas cargas e por vezes a prejuízos monetários muito elevados [3]. Neste sentido o mercado evoluiu de forma a criar sistemas de vigilância das linhas de transporte de energia elétrica. Ao longo deste capítulo são apresentados alguns exemplos de sistemas de monitorização de QEE existentes no mercado. De forma consciente com este problema o Grupo de Eletrónica de Potencia e Energia (GEPE) da Universidade do Minho também teve uma crescente preocupação nesta área e como tal também realizou alguns esforços neste âmbito de forma a satisfazer as condições de um sistema de monitorização de QEE. Posto isto, são apresentados, a baixo, alguns exemplos de sistemas de monitorização existentes no mercado e conseguidos pelos investigadores do GEPE, são caracterizados quanto ao software e ao hardware. Por fim, é apresentada uma conclusão de forma a elucidar e realçar as semelhanças e as diferenças entre os sistemas de monitorização apresentados.

3.2 Dranetz - PowerXplorer PX5

A Dranetz é uma multinacional dos Estados Unidos da América fundada em 1962 pelo Sr. Abraham (Abe) Dranetz, considerado pai da Qualidade de Energia Elétrica. Esta empresa desde a sua fundação especializou-se em aparelhos de medida, devido a isso hoje em dia é uma das mais importantes empresas no ramo dos sistemas de monitorização de QEE [30][31].

Deste modo, sendo a Dranetz uma empresa especializada no ramo de QEE, ela produziu alguns sistemas que se tornaram referência no mercado, entre dos quais se destaca o *PowerXplorer PX5*. Pois este é um sistema complexo, que possui bastantes funcionalidades e pode-se mesmo afirmar que é um analisador da qualidade de energia com inúmeras potencialidades e muito versátil, dada a sua portabilidade. Na Figura 3.1 depara-se com o *PowerXplorer PX5*.



Figura 3.1 - Sistema de monitorização de QEE: *Dranetz PowerXplorer PX5* [32].

O *PowerXplorer* pertence a Class A dos sistemas de monitorização. Este equipamento segue as normas IEEE 1159, IEEE 519, IEEE 1453 e ainda cumpre as normas IEC 61000-4-30 e EN50160. Este equipamento tem uma funcionalidade chave, pois tem a capacidade de detetar a ocorrência de um *flicker*, esta deteção esta de acordo com a norma IEC 61000-4-15. O mesmo possibilita ainda a deteção de harmónicas, esta é feita de encontro com a norma IEC 61000-4-7.

3.2.1 Características de Hardware

Este sistema de monitorização facultado pela Dranetz conta com 8 canais de ADC, sendo que 4 dos quais estão destinados à leitura de tensões e os outros 4 são destinados à leitura das correntes, contanto para cada conversão de valores, por canal, com um atraso de apenas 1 microssegundo. Cada canal disponível de tensão está preparado para ler tensões de valor eficaz entre 1 V e os 600 V, com uma resolução de 16 bits, enquanto que os canais destinados à leitura das correntes permitem fazer leituras de valores entre 0.1 A e os 6000 A em valor eficaz, com a mesma resolução de ADC que os canais da tensão. Por sua vez, cada canal disponível neste dispositivo está isolado dos demais, deixando a configuração de leitura das tensões ao critério do seu usuário. Podendo assim obter as seguintes combinações de tensão, fase-fase, fase-neutro, neutro-terra.

Este dispositivo possui também um LCD (*Liquid Crystal Display*) tátil que permite efetuar a interface entre o aparelho e o utilizador, permitindo, deste modo, que o utilizador verifique toda a informação sobre a qualidade de energia pretendida. Neste dispositivo encontra-se ainda uma *Compact Flash Memory* de 4 Gb, por um lado, esta memória não volátil tem a funcionalidade de gravar eventos de QEE detetados, mas por outro lado, permite ao utilizador gravar a informação disponível no ecrã, através de impressões de imagens. Possuindo ainda várias portas para fazer interface com um PC (*Personal Computer*, ou computador pessoal), sendo estas RS-232, Ethernet e USB, para enviar informação do equipamento para o PC, de

forma que seja possível visualizar num software disponibilizado pela Dranetz. Este software está otimizado para interagir com os dados enviados do *PowerXplorer*.

Este dispositivo contém ainda uma bateria de *backup*, ou seja, se acontecer uma falha de energia ela entra em funcionamento para que o equipamento não se desligue. Quando a energia proveniente da rede voltar a bateria vai restaurar a sua energia, ou seja, volta a carregar para que possa suportar outra falha de energia. A bateria neste equipamento permite, não só a prevenção no caso de uma falha de energia, mas também permite que o equipamento consiga fazer medições e locais mais remotos onde não exista uma alimentação elétrica, nesse caso o aparelho fica dependente, única e exclusivamente, da carga disponível nesse momento.

Na Figura 3.2 estão representadas as 4 faces do *PowerXplorer*, desta forma verifica-se que em (a) está representada a face frontal e esta possui o LCD para interação com o utilizador. De seguida em (b) encontra-se a face de trás do equipamento, onde se pode analisar algumas informações de precaução e onde se tem acesso à bateria. A bateria pode ser encontrada num compartimento retangular, presente na parte central da imagem. Em (c) pode-se encontrar os conectores para ligar as pontas de prova de medição da tensão e os conectores para os sensores de corrente. Por fim, está representado em (d) a parte de interface com as memórias e com o utilizador. Desta forma, no lado esquerdo da imagem encontram-se duas *slots* para colocar as cartas de memória pretendidas, enquanto que do lado direito da imagem encontram-se, da esquerda para a direita, um LED (*Light Emitting Diode*) indicador de estado da bateria, um LED que indica se encontra algum estado anormal no ramal elétrico, um LED que indica se o estado da potência está dentro dos padrões nominais e um botão para ligar e desligar o equipamento.

Por fim, com este hardware implementado o equipamento apresenta-se bastante prático pois este possui as seguintes dimensões, 30 cm por 6.4 cm por 20.3 cm, com o peso bastante acessível para ser transportado, este equipamento pesa apenas 1.9 kg. É importante referir que este equipamento foi dimensionado para operar entre as temperaturas de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ e para uma humidade entre os 10 e 90% sem condensação.

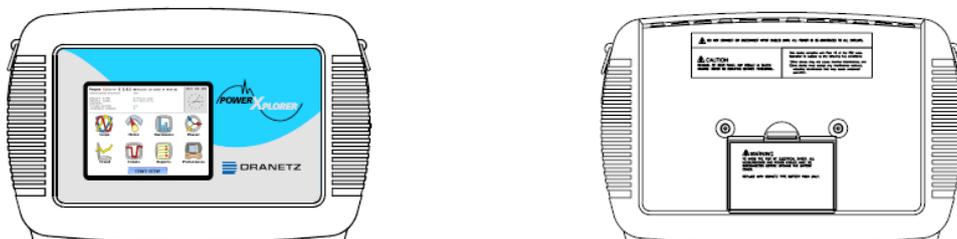




Figura 3.2 - Dranetz PowerXplorer PX5: (a) face frontal; (b) face traseira; (c) face superior; (d) face inferior [32].

3.2.2 Características de Software

O *PowerXplorer* é um equipamento que possui uma interface com o utilizador muito interativa, de fácil utilização e a rápida adaptação ao seu sistema. No seguimento da afirmação anterior surge a Figura 3.3, que demonstra a interface gráfica com que o utilizador se depara quando inicie o equipamento. Nesta figura encontra-se o menu principal, que separa as funcionalidades deste equipamento em subgrupos, sendo estes, o *Scope*, *Meter*, *Harmonics*, *Phasor*, *Trend*, *Events*, *Reports* e *Preferences*, subgrupos que são descritos nos próximos parágrafos.

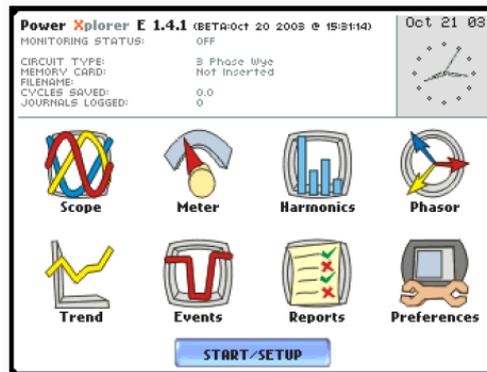


Figura 3.3 - Dranetz PowerXplorer PX5: menu inicial [32].

O equipamento em foco oferece uma interface com o utilizador apelidada por *Scope*, este modo de operação mostra ao utilizador as formas de onda da tensão e da corrente em tempo real. Neste modo pode-se verificar as formas de onda dos oito canais de ADC em simultâneo, quatro correntes e quatro tensões, podendo visualizar ainda os valores eficazes dos sinais e o valor da frequência fundamental dos mesmos. A Figura 3.4 faculta uma melhor perceção do conceito. Se for pretendido, o utilizador pode ainda seleccionar as formas de onda que pretende visualizar, ou seja, pode seleccionar o canal pretendido, de forma a ter uma melhor perceção das formas de onda traçadas.

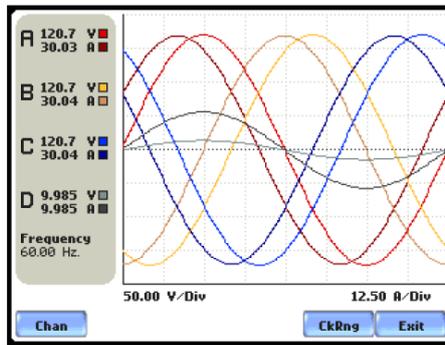


Figura 3.4 - Dranetz PowerXplorer PX5: menu Scope [32].

Na figura anterior, é ainda possível visualizar 3 botões, sendo estes o *Chan*, o *CkRng* e o *Exit*. Em primeiro lugar o utilizador depara-se com um botão chamado *Chan*, quando clicado este abre uma nova janela, semelhante à da Figura 3.5 (a), nesta janela podem ser selecionados as formas de onda que o utilizador pretende visualizar na tela gráfica do menu *Scope*. De seguida, existe o botão chamado *CkRng*, este tem a função de criar uma janela nova onde mostra a amplitude dos valores lidos, comparando com o limite imposto pelo dimensionamento dos sensores, com a ajuda da Figura 3.5 (b) pode-se ter uma melhor perceção do conceito implicado por esta função.

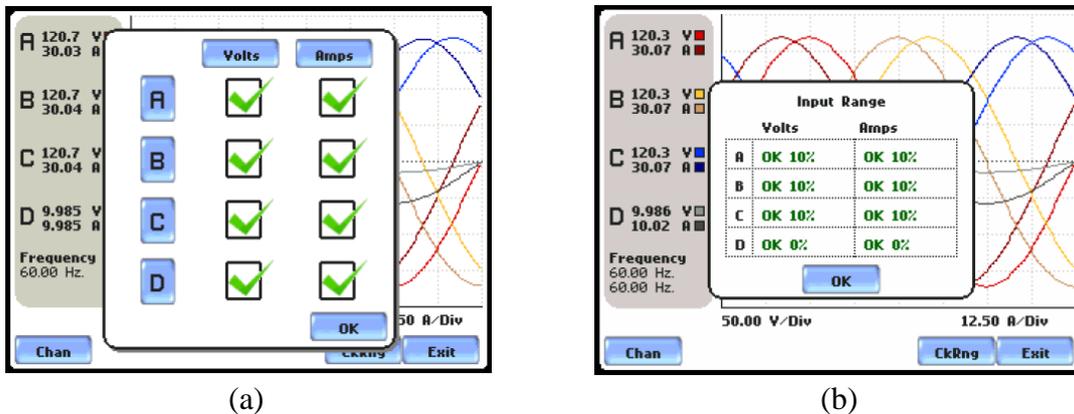


Figura 3.5 - Dranetz PowerXplorer PX5: (a) menu Scope selecionar canal; (b) menu Scope verificar amplitude dos valores lidos pelos sensores [32].

A mensagem verificada na Figura 3.5 (b), que neste caso específico é “OK” seguido do valor percentual 10%, ou seja, o valor lido está dentro dos limites de dimensionamento do equipamento e o valor de amplitude lida é apenas 10% da amplitude total que este permite obter. Na verificam-se o tipo de mensagem, parte não numérica, que pode ser obtida neste menu e uma breve descrição das mensagens. Por fim, o botão *Exit* serve para sair do menu *Scope* e voltar ao menu inicial.

Tabela 3.1 - *Dranetz PowerXplorer PX5*: mensagens sobre a amplitude dos valores lidos [32].

Mensagem	Descrição
OK	Dentro dos Limites
OVER	Acima dos Limites
UNDER	Abaixo dos Limites
N/A	Canal Desativado
CLIP	<i>Clipping</i>

Avançando para o menu *Meter*, este é um menu mais complexo, pois neste o utilizador tem acesso a toda a informação calculada por este sistema de monitorização. De forma a elucidar este menu surge a Figura 3.6 e nela visualiza-se uma vasta e complexa gama de submenus principais, sendo estes, o *Standard*, o *Distortion*, o *UserFreq*, o *Unbalance* e por fim o *Advanced*. Nesta mesma figura surge também a informação adjacente ao submenu *Standard*, sendo que este fornece informação detalhada sobre os sinais lidos pelo *PowerXplorer*.

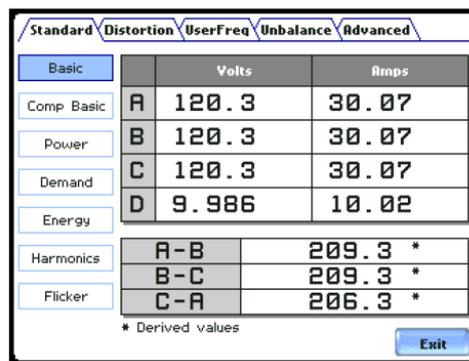


Figura 3.6 - *Dranetz PowerXplorer PX5*: menu *Meter* modo *Standard* [32].

Numa primeira análise do menu *Meter* surge o submenu *Standard*, este oferece várias competências. A opção *Basic* fornece informação sobre os valores eficazes das tensões e das correntes, ainda calculando as tensões compostas dos sinais de entrada. Na componente *Comp Basic* são fornecidos os dados sobre o vetor do fator de potência de deslocação, mais conhecido pelo termo da literatura inglesa DPF (*Displacement Power Factor*), a aritmética do fator de potência de deslocação, correntes residuais e sobre a corrente total. Seguidamente na competência *Power*, depara-se com o cálculo das potências de cada canal e da potência total do sistema em questão, calcula as potências ativas, reativas e aparentes mais o fator de potência total e o fator de potência de deslocação.

De seguida o utilizador encontra a opção *Deman*, esta opção surge na necessidade de mitigar os problemas de QEE, pois esta opção calcula os valores das potências e das correntes como

elas seriam sem as anomalias provocadas pelo sistema. Posto isto, esta permite calcular a potência ativa, reativa e aparente e também o valor das correntes nas três fases sem problemas de desfasamentos e de harmónicos, sem afetar o funcionamento das cargas. Esta opção calcula ainda a média dos valores de variação das correntes em relação com as correntes fornecidas pelas leituras do sistema em questão.

O submenu *Standard* faculta ainda as opções *Energy*, *Harmonics* e *Flicker*. A opção *Energy* mostra ao utilizador os valores da energia ativa, reativa e aparente de cada fase do sistema e por fim, o valor do total da energia consumida. A próxima opção, *Harmonics*, permite visualizar o THD das 4 tensões, das três fases mais a tensão entre o neutro e a terra, e das 4 correntes. Também permite visualizar o valor eficaz das correntes harmónicas e a potência harmónica total. Por último, existe a opção *Flicker*, sendo que esta opção oferece a possibilidade de visualizar algumas propriedades da deteção de um *flicker*, o *short term flicker* (P_{st}), o *long term flicker* (deslizante) e o *long term flicker* (P_{lt}).

Posto isto, é de salientar que o menu *Meter* também possibilita fazer a análise da distorção que o sinal obtido sofreu, para isso é necessária a visualização do submenu *Distortion*. Este faculta as opções THD, TID (*Total Interharmonics Distortion*), TIF (*Telephone Influence Factor*), *Crest Factor*, *Power* e *Transformer*. A Figura 3.7 confirma a informação acima descrita.

	VTDC(%) fund	ITDC(%) fund	VTDRSS	ITDRSS
A	0.055	0.052	<0.01	<0.01
B	0.050	0.051	<0.01	<0.01
C	0.050	0.052	<0.01	<0.01
D	0.118	0.088	<0.01	<0.01

Figura 3.7 - Dranetz PowerXplorer PX5: menu *Meter* modo *Distortion* [32].

O submenu *UserFreq* surge no seguimento do menu *Meter* do *PowerXplorer*. Este submenu faculta ao utilizador a possibilidade de visualizar o valor de pico de cada harmónica até à sexagésima, mas por outro lado só possibilita a visualização de quatro frequências harmónicas de cada vez. Posto isto, o utilizador tem de selecionar previamente as frequências harmónicas que pretende adquirir. Na verifica-se a interface do submenu *UserFreq*.

	User1	User2	User3	User4
A	180.0 Hz 0.016	300.0 Hz 0.023	420.0 Hz 0.023	540.0 Hz 0.016
B	180.0 Hz 0.016	300.0 Hz 0.023	420.0 Hz 0.016	540.0 Hz 0.023
C	180.0 Hz 0.016	300.0 Hz 0.023	420.0 Hz 0.016	540.0 Hz 0.023
D	180.0 Hz <0.01	300.0 Hz <0.01	420.0 Hz <0.01	540.0 Hz <0.01

Figura 3.8 - Dranetz PowerXplorer PX5: menu *Meter* modo *UserFreq* [32].

O menu *Meter* apresenta ainda mais dois submenus, sendo estes o *Unbalance* e o *Advanced*. O submenu *Unbalance* facultava a visualização dos valores eficazes da tensão e da corrente perante a sequência que estes estão inseridos, por exemplo, o valor eficaz na fundamental, na quarta e na sétima harmónica são somados e surgem no valor eficaz total das tensões de sequência positiva e assim sucessivamente, este modo possibilita também identificar o fator de desequilíbrio das fases, tanto na corrente como na tensão. O submenu *Advanced* facultava um modo de operação avançado baseado em algoritmos de cálculo algo complexos.

O menu *Harmonics* é uma opção do menu inicial deste dispositivo, este menu facultava a visualização gráfica e numérica do conteúdo harmónico do sistema medido. Numa primeira fase, neste menu pode ser visualizado graficamente o conteúdo, com informação percentual sobre a magnitude de cada harmónica presente no sinal lido, apresenta também informação sobre o THD das harmónicas pares, ímpares e o valor total do THD e do TID da fase selecionada, importante referir que este menu representa os valores de pico das harmónicas até a sexagésima harmónica. A Figura 3.9 valida a informação fornecida anteriormente, mas pode-se ainda verificar que esta interface facultava ao utilizador 6 novos botões, sendo estes o *Chan*, o *Param*, o *Detail*, o *Options*, o *List* e o *Exit*.

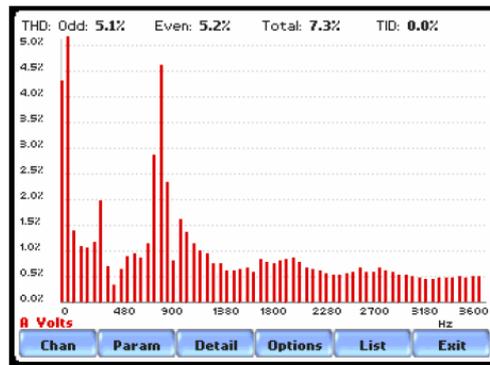


Figura 3.9 - Dranetz PowerXplorer PX5: menu *Harmonics* [32].

O *Exit* como já se verificou anteriormente, serve para voltar ao menu inicial. Os botões *Chan* e *Param* surgem em complemento um do outro, pois o primeiro serve para escolher a fase que o utilizador pretende e o segundo serve para identificar se o utilizador pretende que o gráfico seja da tensão, da corrente ou se pretende visualizar o gráfico da potência ativa. Seguidamente, ao clicar no botão *Detail*, irá surgir uma tela a azul sobre o gráfico, que pode ser ajustada pelo utilizador, esta tela azul que surge sobre o gráfico é a parte do gráfico que o utilizador pretende visualizar ao pormenor, precisando assim os valores das harmónicas, esta só pode ser ajustada no eixo das frequências. Ao ser ajustada a escala, o gráfico vai possibilitar a visualização de inter-harmónicas, estas surgirão no gráfico sobre barras cinzentas.

Ao premir o botão *Options* surgirá uma janela com uma lista de opções de configuração do gráfico onde se pode seleccionar a forma como os dados são mostrados. Por exemplo a escala do eixo vertical pode ser percentual ou em valor de pico da harmónica em questão. O botão *List* é a opção que permite ao utilizador verificar os valores das magnitudes e das fases de cada harmónica. Os valores podem ser apresentados por ordem crescente de frequências, mas também podem ser organizados por ordem decrescente de magnitudes. O utilizador pode ainda ver só o valor da fase na fundamental, ou ver o valor da fase de todas as harmónicas em relação à fase na frequência fundamental. Na Figura 3.10 surge de forma a validar a informação facultada sobre o funcionamento do botão *List*.

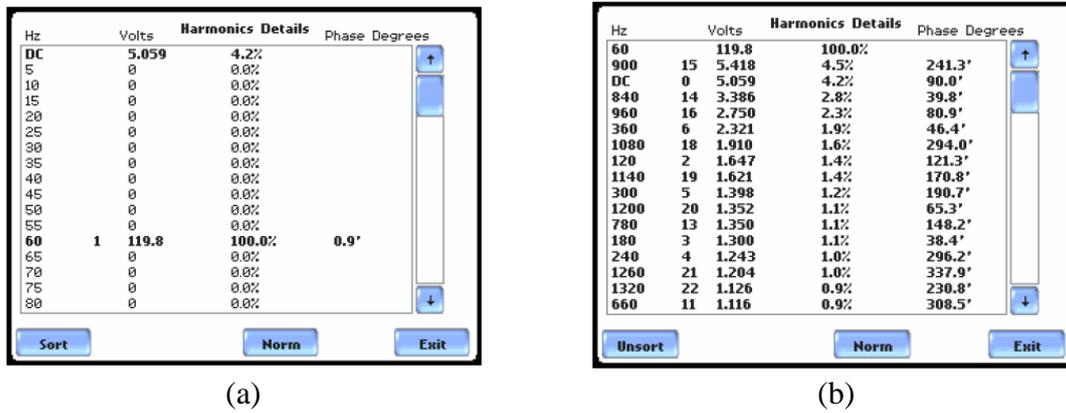


Figura 3.10 - *Dranetz PowerXplorer PX5*: menu *Harmonics* lista dos valores das harmónicas (a) ordem crescente de frequências; (b) ordem decrescente do valor de pico das harmónicas [32].

Em seguimento do tema surge o menu *Phasor*, este tem como principal função desenhar um gráfico rotacional em que apresenta o desfaseamento entre fases. Este gráfico é desenhado utilizando como referência a fase na fundamental do sinal lido no canal A. A interface produzida por este menu disponibiliza também os valores numéricos associados, ou seja, o valor eficaz e a fase na fundamental da tensão e da corrente dos 8 sinais lidos pelo ADC, assim como os valores de desequilíbrios de fases obtidos. É importante referir que os fasores do canal D só são possíveis de visualizar se o valor eficaz da tensão e da corrente na fundamental forem superiores a 20% do valor eficaz das outras fases. Na Figura 3.11 verifica-se a informação facultada por a interface com o utilizador do menu *Phasors*. Neste menu é ainda possível verificar um botão chamado *Demo*. Este serve para simular os fasores e as ondas perfeitamente sinusoidais, ou seja, só com a componente fundamental dos sinais e serve também para prever o comportamento das ondas e dos fasores para diferentes cargas. Este caso específico simula o comportamento das tensões e das correntes com cargas resistivas, capacitivas e indutivas e para estas simulações é ainda possível escolher onde pretende colocar as cargas selecionadas.

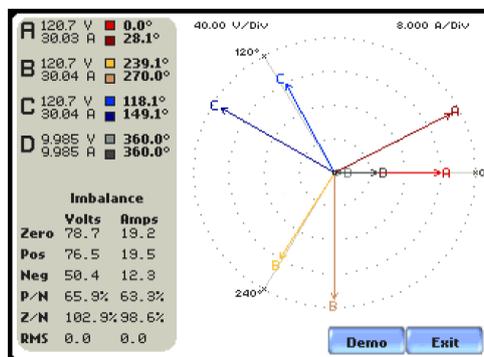


Figura 3.11 - *Dranetz PowerXplorer PX5*: menu *Phasor* [32].

No menu inicial do *PowerXplorer* pode ainda encontrar os menus *Reports* e *Preferences*. O menu *Preferences* faculta ao utilizador a possibilidade de configurar alguns parâmetros

relacionados com a interface, a transferência de dados com um PC, o idioma do aparelho, a data e hora e os parâmetros relacionados com as memórias externas. Pode ainda fazer uma calibração do ecrã e a reconfiguração total para que o aparelho fique com as configurações de fábrica. A função do menu *Reports* é traçar gráficos dos problemas de QEE que atormentaram a instalação elétrica em questão.

No dispositivo da Dranetz existem também os menus *Events* e *Trend*. O menu *Events* conta com uma vasta gama de informação, pois este traça o gráfico da alteração na forma de onda, traça também a evolução do valor eficaz ao longo do evento detetado, podendo ainda fazer zoom nas diversas áreas dos gráficos traçados, conta ainda com uma opção que tabela os dados obtidos da leitura para uma análise numérica dos eventos. O menu *Trend* permite ao utilizador capturar os valores que pretende traçar num gráfico de evolução temporal desses mesmos, sendo assim se o utilizador pretender visualizar a evolução temporal do valor eficaz ao longo de um período de tempo, este menu disponibiliza essa tarefa. Na (a) encontra-se um exemplo do menu *Events* em que reporta ao utilizador um evento de QEE, nomeadamente uma cava de tensão, e mostra a variação do valor eficaz da tensão ao longo deste. Na (b) encontra-se um exemplo do menu *Trend*, em que este traça a evolução temporal do valor eficaz das tensões nas três fases de um sistema elétrico num dado período de tempo.

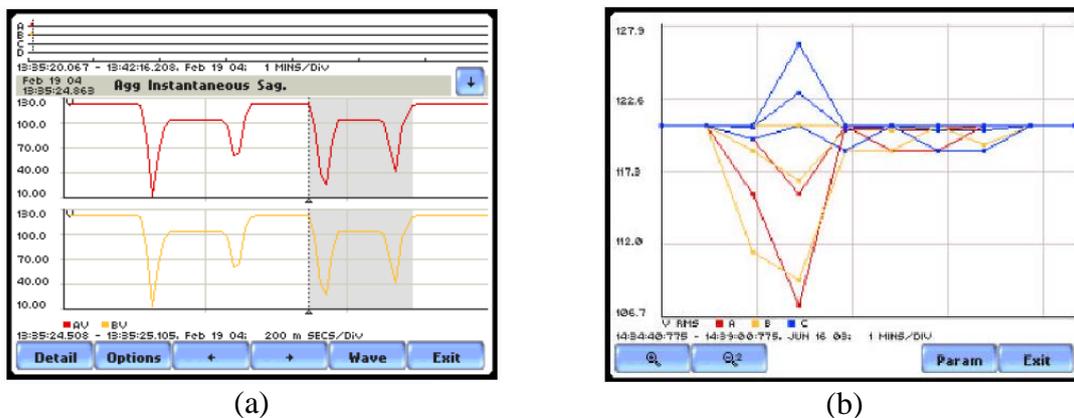


Figura 3.12 - Dranetz PowerXplorer PX5: (a) menu *Events*; (b) menu *Trend* [32].

Concluindo, o *PowerXplorer* é um aparelho que faculta várias opções para a avaliação da qualidade da energia, por este motivo foi focalizado e pormenorizado. Este aparelho desenvolvido pela empresa Dranetz pode-se considerar um aparelho fácil de transportar e fácil de montar no local de avaliação da QEE, em contrapartida é um dispositivo dispendioso para um vasto leque de empresas, visto que o custo de obtenção deste equipamento poderá rondar os dez mil euros.

3.3 Fluke – Fluke 1738 Power Logger

A Fluke é uma empresa multinacional fundada em 1948 por o Sr. John Maurice Fluke. Esta empresa desde o seu surgimento especializou-se no desenvolvimento de equipamentos de medida e de deteção, hoje em dia esta é líder mundial na construção, distribuição e assistência técnica de equipamentos de sistemas vigilantes de eletrónica. Desta forma, ela tornou-se vital para o desenvolvimento e construção de equipamentos com eletrónica [33][34].

Desta forma e dada a importância da Fluke no mundo dos sistemas de vigilâncias dos sistemas elétricos, foi selecionado o *Fluke 1738* visto ser um analisador de QEE indicado no mercado de sistemas de monitorização, devido às suas características a nível de hardware, à sua documentação e a sua interface com o utilizador ser simples e de rápida adaptação. Posto isto, este dispositivo é uma referência no mercado dos sistemas de monitorização de QEE. Na Figura 3.13 depara-se com o analisador de energia *Fluke 1738*.



Figura 3.13 - Sistemas de monitorização QEE: *Fluke 1738* [35].

O *Fluke 1738* é um que faculto ao utilizador uma gama alargada de funcionalidades para a avaliação da qualidade energética do sistema. Este aparelho foi dimensionado de forma para que as medições dos parâmetros respeitem a norma de QEE EN50160. Este equipamento permite ainda calcular as harmónicas dos sinais lidos, esta é feita de forma a respeitar as normas IEC 61000-4-7: Class 1 e IEEE 519 (harmónicas de curto período), os parâmetros de QEE respeitando as normas IEC 61000-4-30 Class S, IEC 62586-1 (dispositivos PQI-S) e por fim calcula as potências respeitando a norma IEEE 1459.

3.3.1 Características de Hardware

Este sistema de monitorização conta com 8 canais de ADC, 4 dos quais estão destinados à leitura das tensões, tensões essas que podem ser no máximo 1000 V de valor eficaz. Os outros 4 canais disponíveis destinam-se à leitura das correntes, estas podem variar bastante dependendo das pinças escolhidas para o efeito. Este equipamento está preparado para uma

gama específica de pinças e nos extremos a corrente pode variar entre 4 mA e os 6000 A. A leitura dos canais de ADC conta ainda com uma resolução de 16 bits e uma amostragem do sinal à frequência de 10,24 kHz. Este ainda foi preparado para ler sinais com frequências compreendidas entre os 42,5 e os 3500 Hz. Este sistema de monitorização possui ainda um canal de ADC extra, que tem como principal função a leitura de valores CC. Este canal extra foi desenhado de forma a suportar tensões entre os 0 e os 10 V e foi concebido para dar mais suporte ao utilizador, nomeadamente, para a leitura de temperaturas, de pressão ou de velocidades. Este canal possui um sistema de ganhos e *offset* ajustável pelo utilizador, possuindo uma taxa de atualização de 1 amostra por segundo.

Este dispositivo foi preparado com múltiplas interfaces: possui uma interface de visualização, ou seja, possui um LCD sensível ao toque, com uma resolução de 480 por 272 pixels, com dimensão de 4.3 polegadas, e conta ainda com um painel tátil resistivo. Este aparelho conta também com algumas interfaces para a transmissão de dados previamente recolhidos, sendo elas uma USB-A, esta servirá para a transmissão de dados recolhidos para uma memória flash, e com uma USB-mini para descarregar os dados do equipamento para um PC. Os dados fornecidos por este dispositivo também podem ser obtidos remotamente por um *smartphone*, ou semelhante, pois disponibiliza duas interfaces que possibilitam esta transmissão de dados, sendo estas a comunicação Bluetooth e a Wi-Fi, sendo que para estas é necessário um equipamento extra que pode ser obtido também na Fluke. Os módulos de Bluetooth e Wi-Fi podem ser conectados na parte de traseira do equipamento, como se constata na Figura 3.14. Para este último tópico ser possível é necessário ainda o utilizador descarregar uma aplicação móvel fornecida pela empresa.

Este sistema de monitorização contém uma bateria, que tem como principal funcionalidade a disponibilidade de energia elétrica para o caso de uma interrupção no fornecimento de energia elétrica. A existência da bateria neste equipamento irá permitir que ele recolha a informação de um problema de QEE preocupante, sendo este a interrupção de energia. Para tal, este sistema possui funcionalidades de uma UPS e também permite a recolha de dados em locais remotos, onde não existe a capacidade de alimentação elétrica do equipamento, ficando este limitado apenas ao estado de carga da sua bateria. A bateria disponibilizada na compra deste dispositivo é a bateria de Li-ion 3.7 V, 9.25 Wh, é de salientar que o utilizador pode escolher outras baterias desde que estas cumpram os requisitos do equipamento. Através da parte frontal do equipamento pode ser obtida informação sobre o estado da bateria, pois é na parte frontal onde se situa um LED que informa sobre o estado de carga da bateria e sobre a alimentação do sistema, se esta é feita através da bateria ou através da rede.

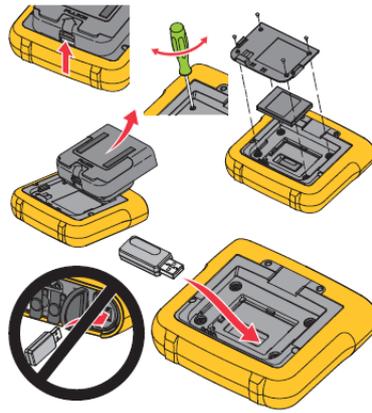


Figura 3.14 - *Fluke 1738*: anexação do módulo *wireless* [36].

O dispositivo ainda oferece uma vasta gama de botões mecânicos, que permite ao utilizador executar alguns processos. Ao observar a Figura 3.15 constata-se que representado pelo algarismo 1 surge o botão responsável por ligar e desligar o equipamento e ainda se o botão for continuamente pressionado aparecerá no ecrã do equipamento a barra status, dando informação sobre o estado da bateria. O grupo de botões representados pelo número 2, são facultados ao utilizador para que este possa seleccionar a informação que pretende visualizar sobre sinais recolhidos, este grupo é constituído por os botões *Meter*, *Power* e *Logger*. Estes são abordados de seguida no subcapítulo caracterização do software.

Seguidamente, na Figura 3.15 encontra-se o botão número 3, o utilizador ao clicar neste abre um menu para a configuração das memórias em que pretende gravar os dados e reconfigura as mesmas. Representado com o número 4 estão dois botões, estes têm a função de controlar o cursor no LCD. Com o número 5 aparece um botão que é responsável por entrar nos menus seleccionados pelo cursor, desta forma sendo possível configurar as características deste aparelho e entrar nos submenus pretendidos. O número 6 representa a trava de segurança deste dispositivo, esta é conhecida como a trava de *Kensington*, a principal função desta é proteger contra roubo do dispositivo. Com o número 7 surge a tecla que permite ligar e desligar a luz de fundo do visor e com o número 8 surgem quatro teclas, teclas estas que interagem com o software diretamente, por isso, serão abordadas com maior rigor na descrição do software do sistema de monitorização. Por último, referenciado com o número 9 aparece o LCD que já foi descrito anteriormente.

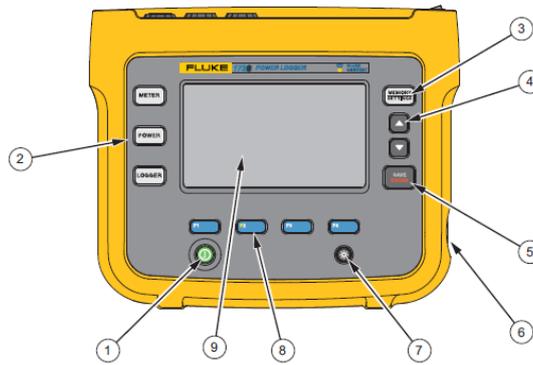


Figura 3.15 - *Fluke 1738*: face frontal [36].

Em suma, este dispositivo com todo o hardware implementado ficou com uma interface simplificada, é possível identificar imediatamente as tarefas que o utilizador necessita de desempenhar com este sistema. Perante todas as condições de hardware, este mostra-se bastante prático, pois é pequeno, nomeadamente 19.8 cm por 16.7 cm por 9 cm já com a fonte de alimentação incluída, uma vez que esta pode ser separada do aparelho. De salientar que este dispositivo é fácil de transportar, pesando apenas 1,1 kg o aparelho sem a fonte de alimentação, que pesa 400 g. Para operar em segurança este dispositivo deve respeitar as condições atmosféricas para as quais foi dimensionado. A temperatura pode variar entre -10 e os 50 °C e os limites da humidade pode variam consoante a temperatura do ambiente em questão. Por exemplo, se a temperatura ambiente estiver compreendida entre os 40 e os 50 °C a humidade máxima é de 45%.

3.3.2 Características de Software

Como foi descrito nas características de hardware deste equipamento, este possui três modos de funcionamento essenciais, sendo estes o *Meter*, *Power* e o *Logger*. Estas três funcionalidades estão associadas aos respetivos botões. Desta forma, o modo de funcionamento *Meter* permite ao usuário obter informação em tempo real dos sinais lidos, possibilitando o utilizador visualizar a evolução das correntes e das tensões ao longo do tempo. Este processo é sempre acompanhado com o cálculo do valor eficaz dos sinais recolhidos. Neste modo é ainda possível visualizar o conteúdo harmónicos do sinal, para a mudança de um modo de operação para o outro é necessário que o utilizador selecione o modo pretendido através dos botões mecânicos F1, F2, F3 e F4. O menu *Meter* está representado na Figura 3.16. Nesta está selecionado o modo *Harmonics*, mostrando as harmónicas existentes no sinal obtido. Nesta mesma figura pode ainda ser visualizada a implementação do modo *Live Trend*.

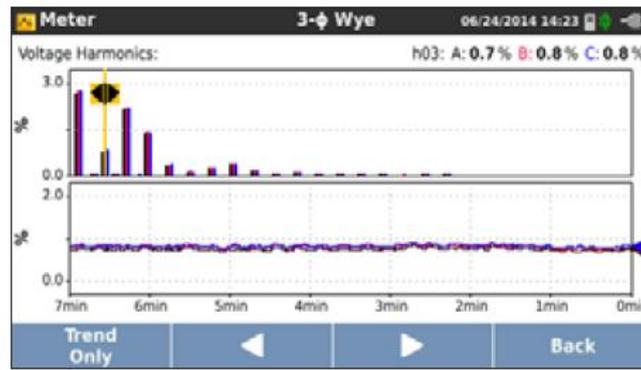


Figura 3.16 - Fluke 1738: menu *Meter* no modo *Harmonics* [35].

O menu *Live Trend* é disponibilizado, como foi expressado anteriormente no modo *Meter*, devido à importância do fluxo de energia num sistema elétrico. Este é facultado de forma a que o utilizador possa avaliar o comportamento do fluxo da energia nas fases do sistema elétrico. Este modo faculto ao utilizador um gráfico percentual do fluxo energético, para que seja possível verificar a tendência da energia elétrica em tempo real até a um período máximo de sete minutos, possibilitando ao usuário conferir se o consumo energético da instalação elétrica está balanceado pelas fases.

Ainda dentro do modo *Meter*, este como se vem a confirmar é um modo muito completo que possibilita, como já foi apreciado, visualizar as formas de onda dos sinais de entrada, das suas harmónicas e ainda permite visualizar o fluxo de energia por um período máximo de 7 minutos. Contudo, este modo oferece mais duas funções sendo estas o cálculo do valor eficaz das tensões e correntes e confirmar a frequência fundamental em que a rede está a operar, tudo isto num menu novo, o mesmo pode-se visualizar na Figura 3.17 (a). Se o utilizador ao fim deste processo não conseguir saber se as tensões não estão em concordância com as correntes, ou seja, durante a ligação das pinças de corrente houve alguma troca de fases ou a pinça foi ligada ao contrário, o utilizador pode clicar no botão *Verify Connection*, para verificar se a tensão e a corrente lidas estão em concordância. Esta informação pode ser confirmada com a Figura 3.17 (a) (b). Utilizando este processo o dispositivo calcula ainda o valor da potência ativa disponível nas três fases e indica, através do fluxo da corrente, se as fases estão a fornecer energia às cargas, ou se estão a enviar energia para a rede elétrica, normalmente este processo pode indicar também que as pinças de corrente foram mal instaladas.

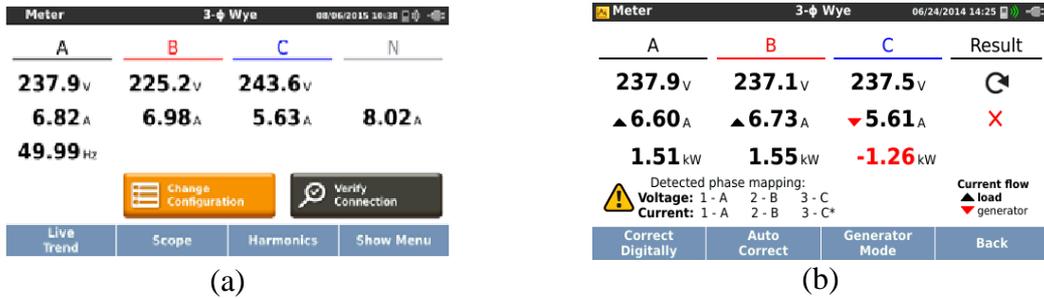


Figura 3.17 - Fluke 1738: (a) cálculo do valor eficaz e frequência; (b) verificação da conexão das pontas de prova [35].

O menu *Power* faculta ao usuário toda a informação sobre a potência ativa, reativa e aparente, fornecendo também informação sobre o fator de potência total e de deslocamento. Este equipamento permite a gravação, em memória não volátil, de eventos rápidos, que acontecem na instalação. Por exemplo, permite a deteção e gravação de informação sobre cavas de tensão, sobretensões momentâneas, interrupções e correntes de arranque, mais conhecidas por correntes *inrush*. O menu *Logger* é o modo em que é facultada ao utilizador a possibilidade de avaliar todos estes eventos de qualidade de energia recolhidos até ao momento pelo equipamento. Este, como se averigua na Figura 3.18, permite visualizar as formas de onda das fases em que ocorreu o evento problemático, com a perceção temporal na qual ocorre. Este permite ainda fazer estimativas de consumo como no menu *Meter*, no entanto estas estimativas de consumo podem ser feitas por um período de tempo mais alargado, não ficando assim limitadas aos sete minutos oferecidos pelo menu *Meter*.

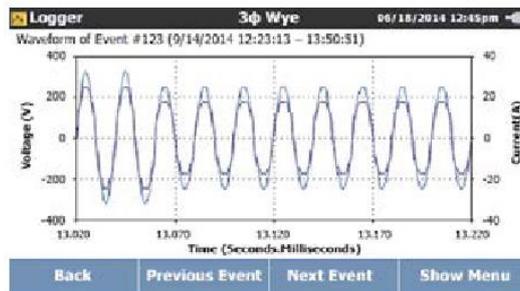


Figura 3.18 - Fluke 1738: menu *Logger* [35].

Por todas as razões assinaladas ao longo do texto, o *Fluke 1738* é um sistema de monitorização de QEE com ótimas características quer a nível de hardware, quer a nível de software. No entanto, comparativamente ao equipamento *PowerXplorer PX5* possui um menor número de funções o que o torna um pouco mais limitado em recursos. No entanto, para o utilizador este é um aparelho mais fácil de utilizar e de adquirir, pois pode ser adquirido por menos de metade do preço, cerca de quatro mil euros.

3.4 GEPE – Sistema de Monitorização de QEE

O Grupo de Eletrónica de Potência e Energia (GEPE) tem tido uma crescente preocupação com a Qualidade de Energia Elétrica (QEE), devido a isso foram formuladas algumas soluções no âmbito de sistemas de monitorização de QEE e de consumos. Desta forma, foram desenvolvidas 3 versões deste sistema, todas elas com inúmeras características e bom desempenho neste âmbito [37][38][39].

Devido às semelhanças entre as versões destes equipamentos foi escolhida apenas uma versão para a descrição pormenorizada do hardware e do software em questão. A versão escolhida foi implementada em 2008, pelo Renato Augusto de Oliveira Alves, no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores. Este trabalho de mestrado foi intitulado como Sistema de Monitorização de Consumos Energéticos e da Qualidade de Energia Elétrica.

Quanto ao sistema de monitorização desenvolvido, este é um sistema que segue a estrutura definida pela Figura 3.19. Ao visualizar a figura, pode-se averiguar que este possui 8 canais de ADC, 4 para a leitura das tensões e 4 para a leitura das correntes. Verifica-se ainda que o sinal registado passa numa placa de acondicionamento de sinal, seguindo para a carta de aquisição e posteriormente este sinal é enviado para um PC para sofrer todo o processo de cálculo das variáveis do sistema e o processo de interface com o utilizador.

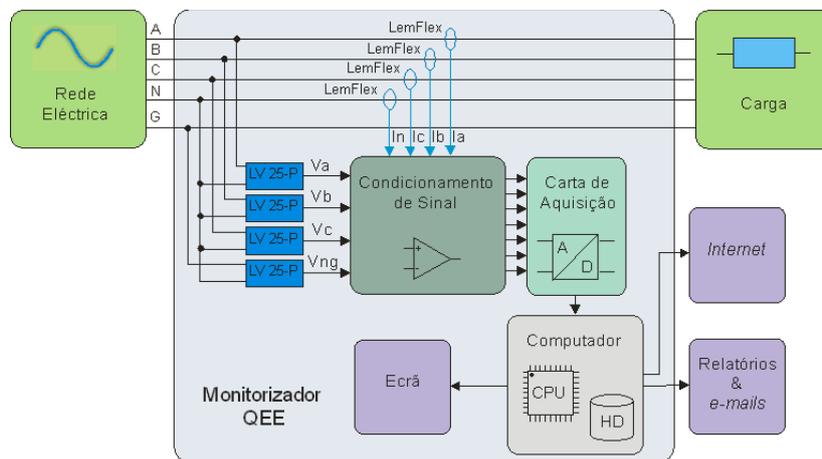


Figura 3.19 - Sistema de monitorização desenvolvido pelo GEPE: esquemático de ligações [38].

A primeira versão deste equipamento foi realizada utilizando um PC o que dificultava a sua portabilidade. Posto isto, o principal objetivo desta dissertação era criar um dispositivo para colmatar esta dificuldade. Foi ainda possível incluir algumas faculdades ao sistema de monitorização, tornando-o mais autónomo e mais competente nos métodos de avaliação de QEE.

3.4.1 Características de Hardware

O sistema de monitorização em análise é baseado na *motherboard EPIA mini-itx MII 12000*, na Figura 3.20 é apresentado o seu aspeto físico. Em conjunto com esta placa encontra-se o processador *VIA C3*. Este processador possui uma arquitetura x86 e possui uma frequência de 1.2 GHz. Foi ainda incluído na *board* um disco rígido com boa capacidade de registo de informação, este possui uma capacidade de armazenamento de 80 GB e conta apenas com a dimensão de 2.5 polegadas. A fonte de alimentação para esta placa é a *pico-PSU-60WI* que possui disponibiliza uma potência máxima de 60 W.

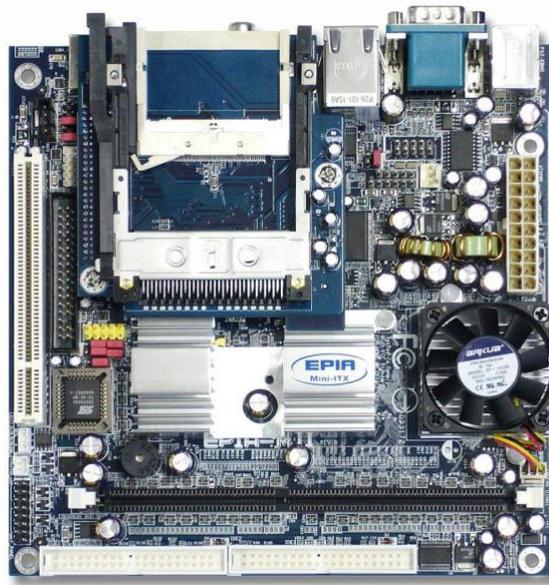


Figura 3.20 - *Motherboard* integrada no sistema de monitorização desenvolvido pelo GEPE [38].

Para a aquisição de sinal foi conseguida uma carta de aquisição da National Instruments, modelo *NI PCI-6220*. Esta carta de aquisição de sinal possui ótimas características para um sistema de monitorização, mais especificamente possui um ADC de 16 bits, uma taxa de amostragem máxima de 250 kS/s, possui uma gama de valores analógicos de entrada de ± 10 V, ± 5 V, ± 1 V e $\pm 0,2$ V, 2 Contadores / timers de 32 bits, uma PLL (*Phase-Locked Loop*), um gerador de frequências e um relógio, tudo isto com a dimensão de 9,7 cm por 15,5 cm e com um peso de 91 g.

Como já foi referido, o grande objetivo a nível de hardware era torna-lo mais compacto, deforma a que a sua portabilidade fosse mais cómoda, para que a migração deste equipamento fosse feita com uma maior facilidade. Para tal, este equipamento foi incluído numa mala, mala esta que faculta acesso muito fácil às fichas de ligação dos sensores de corrente, dos sensores de tensão e da fonte de alimentação. Um aspeto tido em conta neste projeto foi a

ventilação deste sistema, uma vez que o mesmo pode estar sujeito a elevadas temperaturas. Na Figura 3.21 verificar-se o resultado final da montagem do equipamento.



Figura 3.21 – Sistema de monitorização desenvolvido pelo GEPE: Resultado final da montagem do hardware [38].

A mala concebida possui também a possibilidade de ser trancada com um cadeado, o que previne a interferência externa no caso de o equipamento estar a fazer uma monitorização programada. Ao visualizar a lateral da mala pode-se verificar o local onde estão colocadas as entradas dos sensores de tensão e as fichas para de acoplamento dos sensores de corrente. Esta conta ainda, no seu interior, com um monitor LCD TFT (*Thin Film Transistor*) de 14 polegadas, que possui a função de fazer a interface entre o sistema de monitorização e o utilizador.

3.4.2 Características de Software

O software deste equipamento divide-se em várias aplicações que permitem ao utilizador deste equipamento avaliar vários aspetos da QEE da rede elétrica onde foi instalado. O equipamento permite analisar graficamente os sinais de entrada, permite detetar eventos de tensão, tais como cavas de tensão, sobretensões momentâneas e interrupções, permite ainda, avaliar graficamente o conteúdo harmónico do sistema, calcular potências, fatores de potência e calcular a energias do sistema, permitindo ainda determinar desequilíbrios de tensão e de correntes. O software apresentado a seguir foi formulado utilizando o ambiente de desenvolvimento, fornecido pela National Instruments, LabView (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*).

A aplicação *Scope e THD* permitem ao utilizador avaliar os sinais que está a adquirir. Esta aplicação tem com principal função o cálculo do valor eficaz, do valor médio e do valor pico-a-pico dos sinais e disponibilizar ao utilizador a forma de onda dos sinais adquiridos. Permite ainda, o cálculo das componentes harmónicas dos sinais e o respetivo THD. As harmónicas do sinal são calculadas até à sexagésima quinta harmónica do sinal presente. Na Figura 3.22 encontra-se uma visão geral da aplicação *Scope e THD*, averiguar-se também que esta aplicação conta com quatro menus distintos, sendo estes a *Visualização Scope e THD*, *Mais Gráficos de Harmónicos*, *Configuração de Relatórios* e a *Configuração do Hardware*, na figura está evidenciado o menu *Visualização Scope e THD*. O menu *Mais Gráficos de Harmónicos* permite ao utilizador visualizar as harmónicas existentes em todos os sinais lidos, os outros dois menus servem para executar as configurações que o utilizador achar necessário.

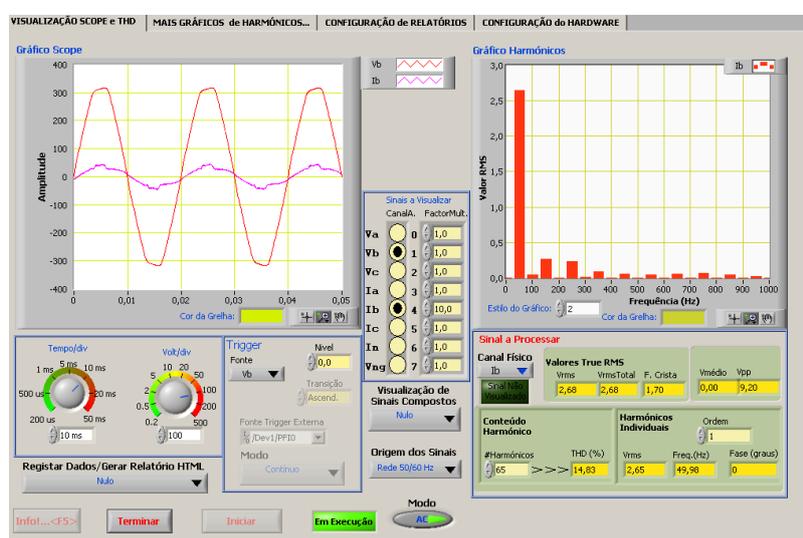


Figura 3.22 - Sistema de monitorização desenvolvido no GEPE: aplicação *Scope e THD* [38].

Existe outra aplicação associada a este sistema de monitorização, sendo esta a *EventosPQ*. Esta aplicação faz a aquisição contínua do sinal a partir dos oito canais de ADC disponíveis, sendo possível efetuar alguns cálculos necessários. Esta aplicação tem a principal função de detetar eventos de QEE. Quando é detetado algum evento de QEE, é de imediato guardado os cinco ciclos da rede que o antecedem e o ciclo onde foi detetado, assim como a data e a hora da ocorrência. Esta aplicação permite ainda agendar monitorizações, gravando em memória não volátil a forma de onda dos sinais adquiridos. Para além disto, esta aplicação calcula e guarda em memória algumas das características dos sinais adquiridos, sendo estas o valor eficaz, o THD, desequilíbrios de tensão, desequilíbrios de corrente, fator de potência total, potência aparente, potência reativa, potência aparente, energia ativa e reativa. Esta é essencialmente uma aplicação de configuração de parâmetros, visto que esta aplicação não

disponibiliza o total da informação para o utilizador em tempo real e permite ao utilizador deste equipamento agendar monitorizações, analisando a Figura confirma-se esta informação. A aplicação permite, tal como a aplicação *Scope e THD*, enviar mail para o utilizador com informações importantes para o utilizador, para tal é necessário entrar no menu *Configuração do E-Mail* e configurar com os seus dados.

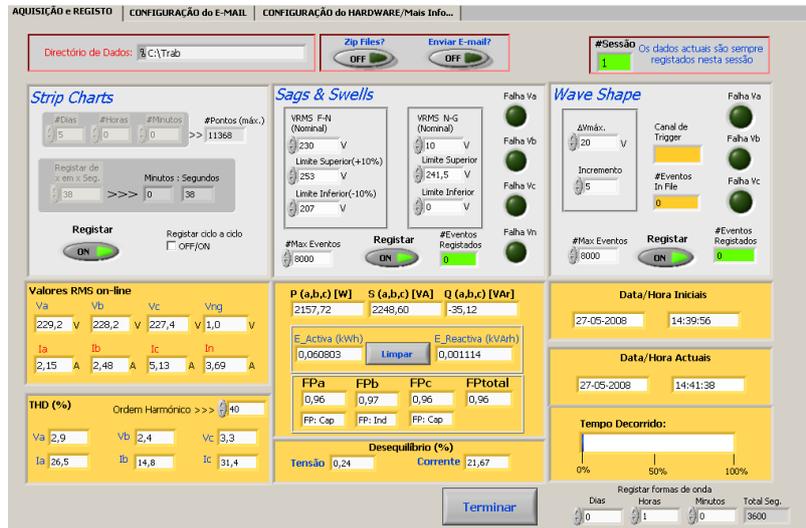


Figura 3.23 - Sistema de monitorização desenvolvido no GEPE: aplicação *EventosPQ* [38].

Este sistema de monitorização permite ao utilizador fazer um registo integral dos sinais de entrada, para isso é necessário que o utilizador selecione a aplicação *Registo Contínuo*. Esta tem duas funções principais que são, o registo contínuo do sinal a partir do momento em que o utilizador prime o botão *Start* e o registo do sinal previamente agendado, para tal é necessário que o utilizador selecione o período de tempo que pretende efetuar a captura do sinal, esta aplicação grava todas as amostras recolhidas para posterior análise.

A aplicação *Relatórios* que é disponibilizada pelo equipamento tem a função de mostrar ao utilizador os dados registados na aplicação *EventosPQ*. Esta desenha os gráficos dos dados gravados, facultando ao utilizador uma vasta informação de QEE sobre as amostras recolhidas. Esta aplicação torna-se vital porque permite a leitura e a análise dos dados que estão em memórias, facilitando a tarefa de análise dos dados recolhidos pela aplicação *EventosPQ*. Permite ainda, que o utilizador gere relatórios sobre a informação pretendida.

A aplicação *Grandezas Clássicas* permite visualizar os fasores das tensões e das correntes, bem como, calcular o valor eficaz dos sinais, defasamentos, impedâncias por fase, desequilíbrios de tensão e de corrente, fatores de potência total e de deslocamento, potências ativas, reativas e aparente e a energia. Estes cálculos são facultados em dois modos distintos,

o modo de Aquisição, onde os dados são adquiridos através dos sensores do equipamento em tempo real e o modo Simulação em que os dados são emulados a partir da aplicação.

Este equipamento permite ainda calcular os parâmetros da teoria p-q, para tal é necessário que o utilizador corra a aplicação *Teoria p-q*. Esta aplicação adquire os sinais provenientes dos sensores e através destes calcula os parâmetros necessários da teoria p-q, permitindo ainda visualizar como o sistema elétrico se comportava se a corrente na fonte estivesse em fase com a tensão e descrevesse uma onda perfeitamente sinusoidal. Esta aplicação serve para demonstrar o comportamento de um FAP (Filtro Ativo de Potência) na compensação de problemas de QEE. A interface gráfica produzida para esta aplicação está representada pela Figura.

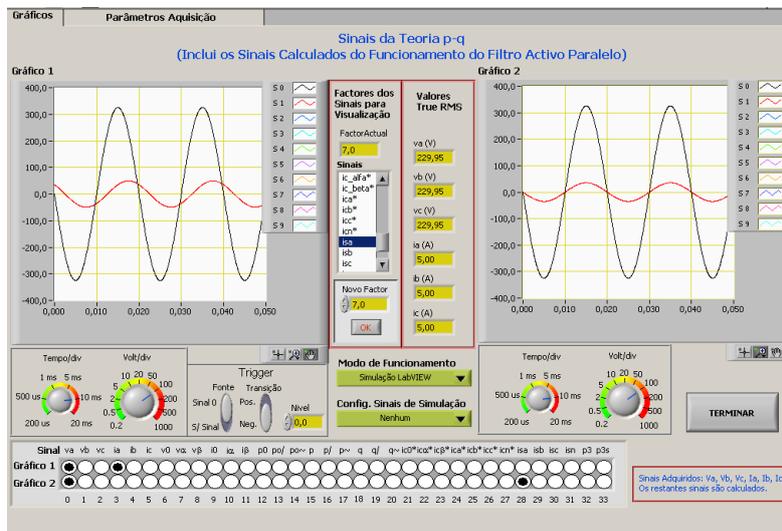


Figura 3.24 - Sistema de monitorização desenvolvido no GEPE: aplicação *Teoria p-q* [38].

Por último, encontra-se a aplicação *Config*, esta surge na necessidade de calibração dos sensores, ou seja, pode ajustar os ganhos e os *offsets* de cada sensor, para tal é necessário calibrar cada canal individualmente, pois os componentes possuem tolerâncias e erros diferentes, como tal tanto o valor do ganho como o valor do *offset* podem divergir de canal para canal. Com a ajuda desta aplicação o utilizador pode ainda trocar os sensores de corrente por outros, desde que possuam a mesma ficha de conexão com o equipamento.

3.5 Conclusões

A crescente preocupação com a Qualidade de Energia Elétrica criou para as empresas a oportunidade de lançarem para o mercado equipamentos de medição cada vez mais perspicazes na avaliação das redes elétricas. Atualmente encontra-se no mercado uma enorme gama de equipamentos para a monitorização da rede elétrica, em contrapartida, estes

equipamentos, na sua maioria, possuem custos muito elevados de aquisição. Posto isto, é importante e motivador criar um dispositivo que permita a avaliação e registo dos eventos de qualidade de energia de baixo custo.

Ao longo deste capítulo foram apresentados alguns equipamentos existentes no mercado para efetuar uma monitorização do sistema elétrico e um equipamento desenvolvido por o GEPE para o mesmo efeito. Os equipamentos foram escolhidos tendo em conta as suas características a nível de hardware e a ótima gama de funções disponibilizada ao utilizador. Também foram escolhidos devido ao facto de todos eles fazerem interface com sistemas trifásicos e por possuírem uma interface para o utilizador bastante acessível e de rápida adaptação. A facilidade de transporte destes equipamentos também é um aspeto muito importante na compra de um equipamento deste género e um aspeto em consideração no desenvolvimento e construção de um.

Capítulo 4

Implementação do Sistema de Monitorização

4.1 Introdução

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do sistema de monitorização de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) e de consumos. Este debruça-se sobre a escolha da placa de desenvolvimento, o dimensionamento dos sensores, a implementação do sistema de condicionamento de sinal e o resultado final incluindo o hardware utilizado com todas as conexões físicas necessárias ao seu funcionamento. Numa última fase da descrição do hardware utilizado será descrita a plataforma utilizada para o desenvolvimento da interface gráfica com o utilizador. As principais metas no desenvolvimento do hardware deste projeto são as dimensões, a possível portabilidade do equipamento e o custo da implementação.

Ao longo deste capítulo será ainda apresentada uma caracterização do software implementado. O software implementado divide-se em três grupos distintos, sendo estes a aquisição de dados, o tratamento a informação adquirida e a interface gráfica produzida. O software foi criado com o recurso a três plataformas diferentes, tendo sido necessário recorrer à troca de informação entre estas plataformas. No decorrer do capítulo são também referidas as tramas de comando e as tramas de dados implementadas. Ainda ao nível do software, será possível averiguar alguns métodos de cálculo utilizados para que o cálculo dos parâmetros de QEE fosse o mais eficiente possível.

4.2 Hardware

O sistema de monitorização, proposto com a realização desta dissertação, é constituído por quatro sensores de tensão e três sensores de corrente, uma placa de condicionamento de sinal com um ADC, uma placa de aquisição e tratamento de dados da Texas Instruments, a *F28M35H52C1*, um RTC (*Real Time Clock*), uma *Raspberry Pi 3* modelo B e um LCD. Todos os componentes aqui apresentados estão devidamente organizados dentro de uma caixa, com exceção dos sensores de corrente e do LCD. Na Figura 4.1 é apresentado o hardware utilizado no desenvolvimento deste sistema de monitorização e as interligações dos componentes em questão.

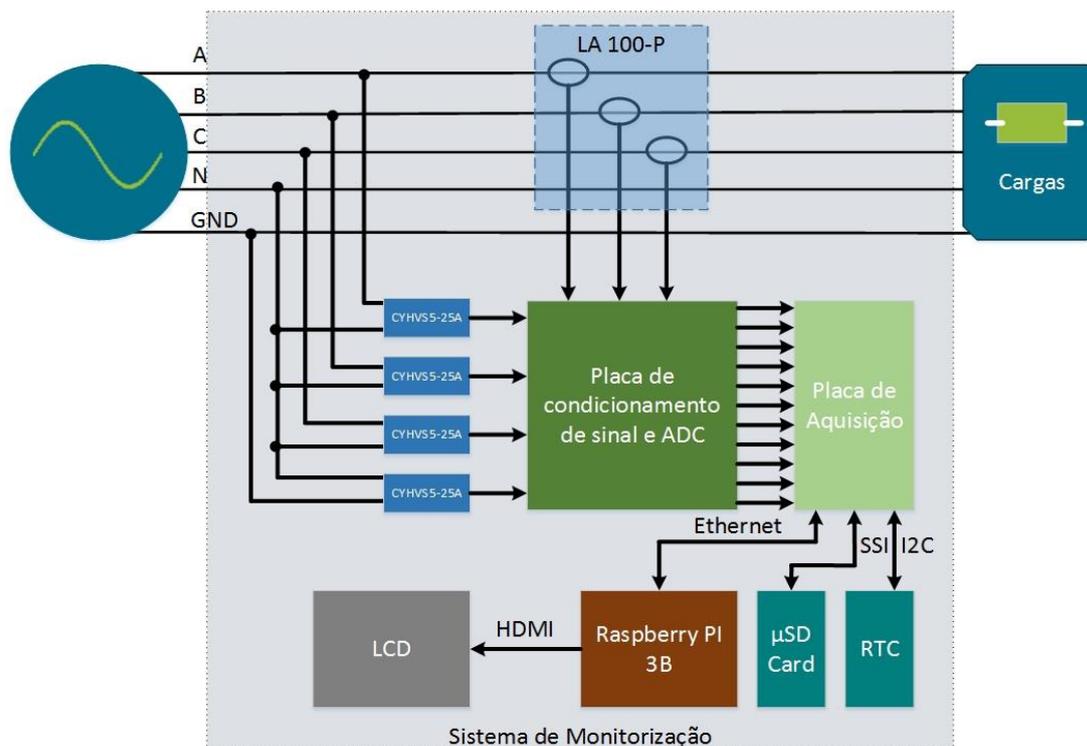


Figura 4.1 - Esquema de blocos do sistema de monitorização implementado.

4.2.1 Sensores de Tensão

Os sensores de tensão escolhidos para a realização deste trabalho são do modelo CYHVS5-25A, facultado pela ChenYang Technologies GmbH & Co. KG. Estes sensores foram incluídos numa placa, na qual se pode contar também com as resistências de ganho para que a medição das tensões seja realizada dentro dos limites dos sensores. Na Figura 4.2 é possível visualizar a placa em questão. Como já foi referido anteriormente, estes sensores efetuam as suas leituras baseadas no efeito de *Hall* com controlo de malha fechada e com o princípio de compensação magnética. Estes sensores garantem ainda isolamento elétrico entre a ala de leitura de tensão (primário) e a ala de medida (secundário).



Figura 4.2 - Sensor de tensão utilizado.

Na Figura 4.3 está presente um esquema das ligações dos sensores de tensão, em que $V+$ e $V-$ identificam o sinal que se pretende medir e I_p é a corrente que atravessa a ala primária do sensor. A resistência responsável por limitar I_p é R_i . Esta resistência tem a função de definir

a corrente que passa no primário do sensor, ou seja, deve ser projetada de forma a que o valor eficaz da corrente no primário se mantenha até no máximo 5 mA. Uma vez que estes sensores são para ligar diretamente à rede o projeto desta resistência deve ser cuidado pois este sistema pode estar sujeito a sobretensões.

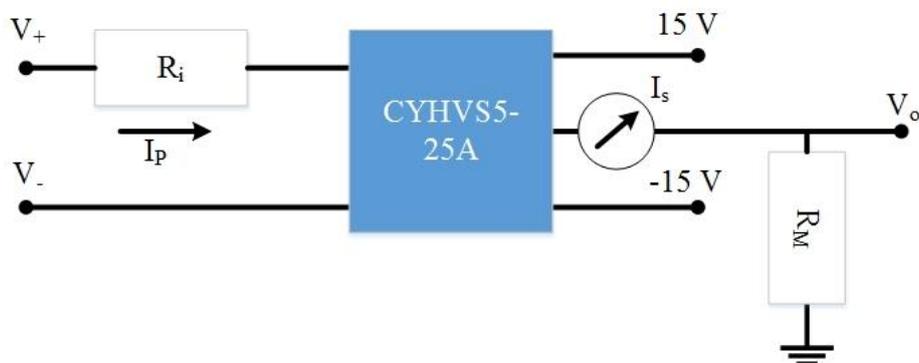


Figura 4.3 - Diagrama esquemático dos sensores de tensão utilizados [40].

Ao analisar a Figura 4.3 verifica-se que do lado direito da mesma encontra-se a ala secundária do sensor, onde se encontram os pinos que são responsáveis pela alimentação do sensor, sendo estes pinos identificados na figura por 15 V e -15 V. Estes valores correspondem às tensões que o sensor necessita para o seu funcionamento. Para o bom funcionamento do mesmo os valores da tensão de alimentação devem se situar numa margem de erro inferior a $\pm 5\%$.

Uma vez que a resposta deste sensor é dada em corrente, I_s , é necessário ao dimensionar o circuito que envolve o sensor que se tenha atenção à resistência R_M . A resistência R_M é responsável por dar uma resposta em tensão proporcional à tensão de entrada do sistema. Para dimensionar a resistência R_M é necessário atender aos valores tabelados pelo fabricante, indicados na Tabela 4.1. É importante referir que estes sensores foram dimensionados para operar entre os -40 e os 85 °C e possuem um tempo de resposta inferior a 40 μs .

Tabela 4.1 - Valor padrão para o dimensionamento da resistência de medida dos sensores de tensão utilizados [40].

I_p	R_{Mmin}	R_{Mmax}
± 5 mA	100 Ω	350 Ω
± 7 mA	100 Ω	190 Ω

4.2.2 Sensores de Corrente

Para efetuar a leitura das correntes do sistema foram utilizados três sensores de corrente da LEM, o modelo LA 100-P. Tal como o sensor de tensão, este modelo de sensores realizam as suas leituras baseadas no efeito de *Hall*, sendo que o aspeto físico destes pode ser visualizado na Figura 4.4. Estes sensores permitem efetuar leituras de corrente alternada (CA), de corrente contínua (CC) e de corrente pulsada. Estes foram dimensionados para que possam ler valores eficazes de correntes até ao máximo de 100 A. Os sensores em análise foram projetados pelo fabricante para operarem a temperaturas compreendidas entre os -40 e os 85 °C e possuem um tempo de resposta inferior a 1 μ s.

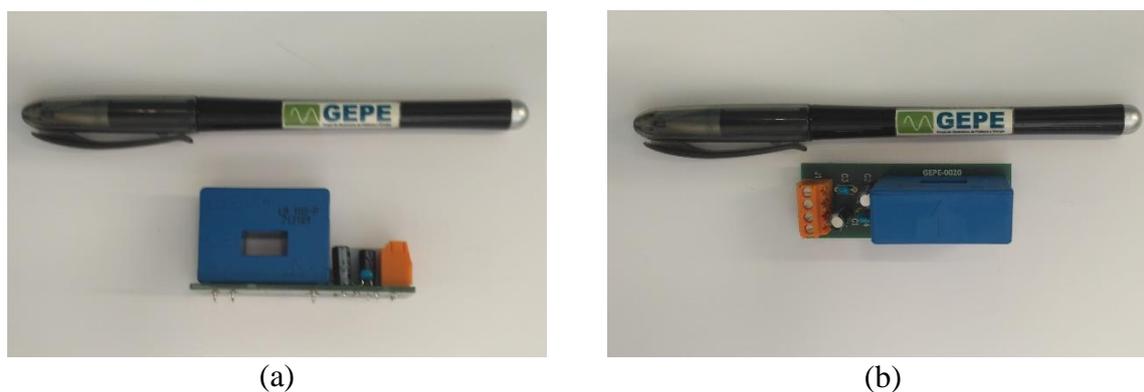


Figura 4.4 - Sensores de corrente utilizados: (a) face lateral; (b) face superior.

Os sensores de corrente utilizados foram montados numa placa, como demonstra a Figura 4.4, para facilitar assim o seu manuseamento no momento da instalação do sistema de monitorização num ramal da rede elétrica. A placa de PCB (*Printed Circuit Board*) projetada para estes sensores foi desenhada de forma a respeitar o esquemático presente na Figura 4.5, em que V_+ e V_- correspondem a alimentação elétrica do sensor. A alimentação deste tem de ser feita em CC e pode variar entre os ± 12 V e os ± 15 V, tendo esta variação implicações na precisão dos valores lidos. Se a alimentação for feita a ± 15 ($\pm 5\%$), o erro da precisão dos valores lidos vai se situar entre os $\pm 0,45\%$; por outro lado, se a alimentação do sensor se situar por volta dos ± 12 V o erro da precisão dos sensores desloca-se para $\pm 0,70\%$ do valor real.

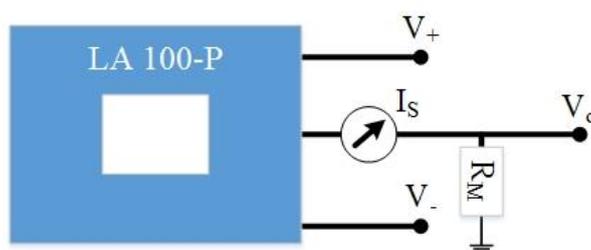


Figura 4.5 - Diagrama esquemático dos sensores de corrente utilizados [41].

Os valores de saída deste sensor, à semelhança do que acontece com o sensor de tensão escolhido, são dados em corrente. O valor desta corrente é proporcional ao valor da corrente lida, por isso, é necessário acoplar à saída uma resistência de medida, R_M . O dimensionamento da resistência de medida tem de ser feito o mais preciso possível, para que não altere a precisão dos valores lidos. Para tal, o fabricante disponibiliza uma gama de valores para o dimensionamento desta resistência. Os valores requeridos podem ser verificados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Valor padrão para o dimensionamento da resistência de medida dos sensores de corrente utilizados [41].

Alimentação	Corrente Lida	$T_A = 70\text{ }^\circ\text{C}$		$T_A = 85\text{ }^\circ\text{C}$	
		$R_{M\min}$ (Ω)	$R_{M\max}$ (Ω)	$R_{M\min}$ (Ω)	$R_{M\max}$ (Ω)
$\pm 12\text{ V}$	$\pm 100\text{ A}_{\max}$	0	50	0	42
	$\pm 120\text{ A}_{\max}$	0	22	0	14
$\pm 15\text{ V}$	$\pm 100\text{ A}_{\max}$	0	110	20	102
	$\pm 150\text{ A}_{\max}$	0	33	20	25

4.2.3 Placa de Condicionamento de Sinal e de ADC

Neste subcapítulo é demonstrada a placa que foi dimensionada para o condicionamento de sinal. Devido à complexidade da mesma, são apresentadas as etapas da sua construção. Em primeiro lugar, será apresentado um estudo sobre filtros passa-baixo para a mitigação do efeito de *aliasing*. Em seguida, será apresentado e caracterizado o ADC escolhido para a conversão dos valores lidos. Por último, apresenta-se o resultado final, que integra o sistema de condicionamento de sinal, o sistema de conversão e todos os pinos necessários para a interface com os sensores e com a placa de aquisição e tratamento de dados.

A recolha de sinal é um passo crucial no desempenho do sistema de monitorização, por isso foi feito um estudo comparativo entre três tipos de filtros passa-baixo analógicos. Para a realização deste estudo foi necessário recorrer a simulações. Para realizar todas as simulações foi utilizado o *PSIM*. Os filtros analógicos simulados foram o filtro passa-baixo de primeira ordem, um filtro passa-baixo de segunda ordem (filtro *Butterworth*) e um filtro de terceira ordem (cascata de filtros – filtro *Butterworth* em série com um filtro de primeira ordem).

Como pode ser visualizado na Figura 4.6 (a), foi feita uma montagem amplificadora inversora para o filtro de primeira ordem. Ao filtro foi adicionado um inversor de tensão à saída da

montagem, que pode ser averiguado na Figura 4.6 (b), para que o sinal de saída fique em fase com o sinal de entrada.

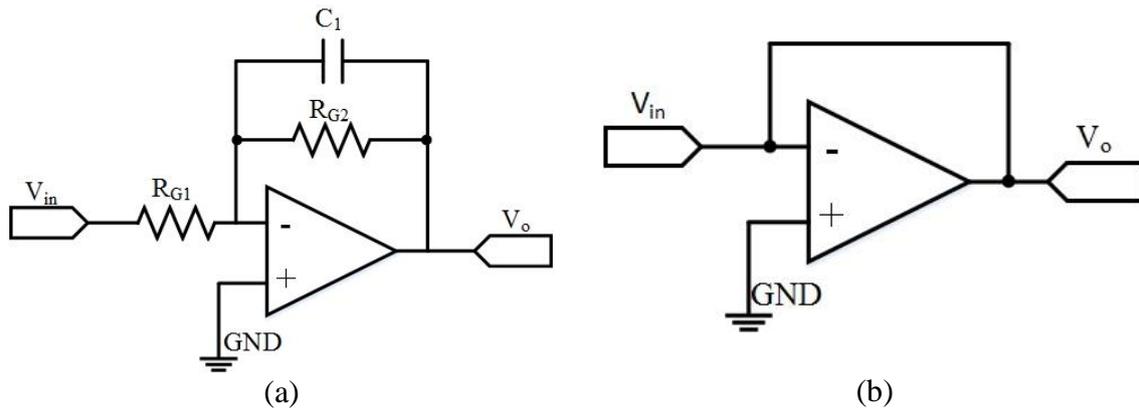


Figura 4.6 - (a) Filtro passa-baixo de 1ª ordem; (b) Inversor de tensão.

O dimensionamento do filtro de primeira ordem simulado foi concebido através da utilização das equações 4.1 e 4.2 [42] [43].

$$f_c = (2 \pi R_{G2} C_1)^{-1} \quad 4.1$$

$$G = -\frac{R_{G2}}{R_{G1}} \quad 4.2$$

De seguida, foram executadas também as simulações dos filtros passa-baixo de segunda e terceira ordem. O filtro de terceira ordem possui características comuns com os filtros de segunda ordem, visto que o filtro de terceira ordem inclui dois estágios, em que o primeiro estágio é composto por um filtro *Butterworth* e o segundo estágio é composto por um filtro passa-baixo de primeira ordem. Na Figura 4.7 (a) e (b), encontra-se os diagramas esquemáticos das montagens adjacentes a cada um dos estágios, respetivamente, o filtro *Butterworth* e o filtro de primeira ordem. Para ser possível obter um filtro de terceira ordem a partir dos filtros representados na Figura 4.7 foi necessário unir os pontos V_{o1} e V_{in2} e ajustar os valores dos componentes que os constituem.

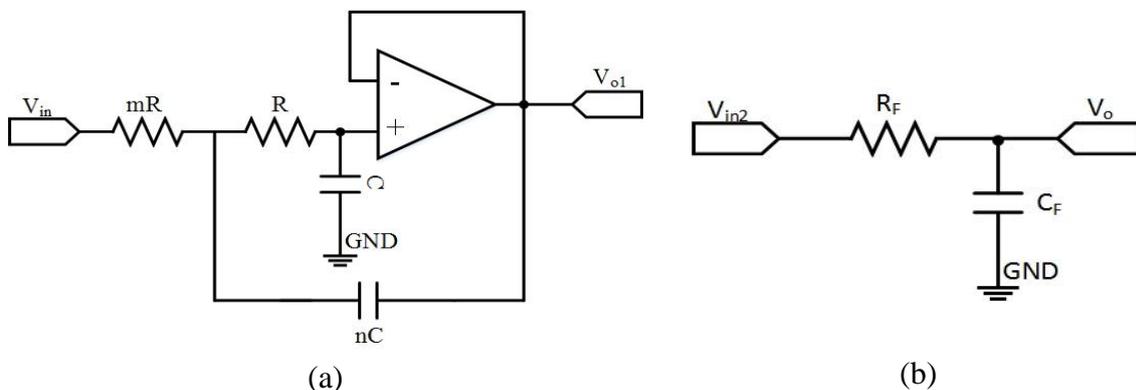


Figura 4.7 - (a) Filtro passa-baixo de 2ª ordem (*Butterworth*); (b) Filtro RC.

Para ser possível dimensionar os componentes pertencentes ao filtro *Butterworth* é necessário ter em atenção a equação 4.3, que permite calcular os valores das resistências e dos condensadores necessários ao filtro através da frequência de corte (f_c) pretendida.

$$f_c = (2\pi R_{G2} C_1 \sqrt{m n})^{-1} \quad 4.3$$

Contudo, o cálculo do valor dos componentes não é realizável apenas definindo a frequência de corte, sendo necessário conhecer a equação do fator de qualidade (Q), equação 4.4.

$$Q = \frac{\sqrt{m n}}{(m + 1)} \quad 4.4$$

O fator de qualidade é o fator que prevê as perdas nas reactâncias, este fator é necessário para possibilitar uma atenuação dos valores das perdas, visto que as perdas nas reactâncias são perdas parasitas e indesejáveis no sinal lido à saída do filtro. Os valores para o fator de qualidade estão tabelados e dependem da ordem do filtro em questão. O Anexo A apresenta os valores predefinidos para este fator [42] [43].

Nas simulações executadas com estes filtros foi possível verificar uma importante melhoria do sinal lido, reduzindo a amplitude das harmónicas com frequências superiores à frequência de corte. Para simular estes filtros foi adotada a frequência de corte igual a 1,6 kHz e uma frequência de amostragem (f_a) igual a 32 kHz. O valor da frequência de corte foi definido desta forma pois este sistema de monitorização foi preparado para ler o valor de frequências harmónicas até à trigésima segunda harmónica, com a frequência de 1,6 kHz. Para o teste realizado aos três filtros passa-baixo foi utilizado o sinal representado na Figura 4.8, que é constituído por uma componente fundamental, com a amplitude de 325 V, e três componentes harmónicas, de 800 Hz, 1,6 kHz e de 3,2 kHz, todas estas componentes apresentam uma amplitude de 10 V. É importante referir que o sinal harmónico à frequência de corte foi introduzido no sinal com o intuito de confirmar o comportamento dos filtros passa-baixo a esta frequência, e os sinais de 800 Hz e 3,2 kHz foram introduzidos no sinal de forma a averiguar o comportamento dos filtros simulados a metade da frequência de corte e ao seu dobro, respetivamente. As componentes harmónicas introduzidas neste sinal foram todas colocadas com a mesma amplitude para que fosse mais fácil verificar a atenuação dos sinais à saída de cada um dos filtros. É de grande importância referir ainda que todos os filtros foram dimensionados com ganho unitário.

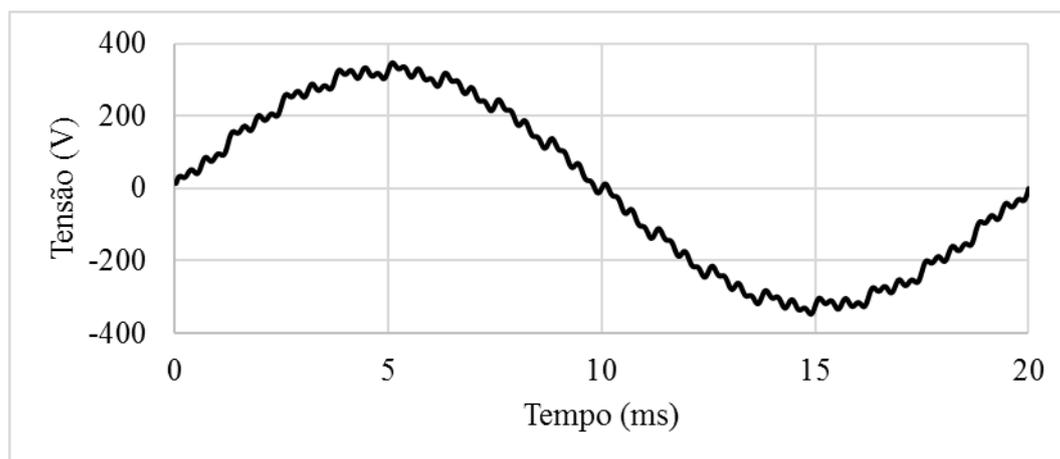


Figura 4.8 - Sinal de teste de todos os filtros passa-baixo estudados.

Como já foi referido os três filtros passa-baixo dimensionados têm o mesmo sinal de entrada para que assim se possa avaliar o desempenho de cada filtro individualmente, quando estão sujeitos às mesmas condições de entrada. Na Tabela 4.3 é possível ver o desempenho de cada um dos filtros no cancelamento das frequências indesejáveis.

Tabela 4.3 - Resposta dos diferentes filtros passa-baixo para diferentes frequências.

	Frequências Testadas (Hz)			
	50	800	1600	3200
Entrada	325,00 V	9,9795 V	9,9181 V	9,6754 V
Saída 1ª Ordem	324,82 V	8,9248 V	6,9884 V	4,2168 V
Saída 2ª Ordem	324,99 V	9,6556 V	6,9206 V	2,1797 V
Saída 3ª Ordem	324,99 V	9,8497 V	6,8465 V	1,0527 V

Analisando os dados fornecidos pela Tabela 4.3 verifica-se que à frequência de 1,6 kHz, ou seja, à frequência de corte, as amplitudes das harmónicas à saída dos três filtros testados são muito aproximados. Em condições ideais de dimensionamento dos filtros os valores a esta frequência deveriam possuir a mesma atenuação, ou seja, uma atenuação igual a 3dB, como é característica destes filtros. Esta condição não se verifica porque durante o dimensionamento dos filtros recorreu-se ao arredondamento dos valores das variáveis. Com este teste foi ainda possível verificar que os filtros de ordem mais baixa afetam mais as amplitudes das harmónicas de frequências inferiores à frequência de corte e atenuam menos os sinais com frequências superiores, do que os filtros passa-baixo com uma ordem superior. Embora os filtros passa-baixo de ordens superiores sejam melhores na qualidade do sinal de saída, estes possuem a desvantagem de um dimensionamento mais complexo e de um preço superior de implementação, pois necessitam de mais componentes eletrónicos.

O estudo sobre o comportamento dos filtros passa-baixo foi realizado com o intuito de uma posterior acoplação ao sistema de monitorização do filtro que verificasse as melhores características segundo este estudo. No entanto, a integração deste filtro não foi realizada porque no GEPE existia já uma placa de condicionamento de sinal com ADC integrado que satisfazia os requisitos desta dissertação. Contudo, foram realizadas algumas alterações na placa de condicionamento de sinal para que a integração desta placa no trabalho desenvolvido fosse um êxito.

O sistema de condicionamento de sinal é constituído por uma montagem amplificadora e por filtros passa-baixo. Estes foram concebidos utilizando amplificadores operacionais (AmpOp), os amplificadores utilizados foram os LM358. Este AmpOp é pouco complexo e da fácil integração nas placas de PCB, podem ser alimentados por tensões até 32 V ou podem ser alimentados também por tensões de ± 16 V, possuem uma largura de banda aceitável, permitindo ler sinais até 1 MHz desde que o ganho seja unitário e possuem uma baixa corrente na *drain*, cerca de 500 μ A. Neste trabalho foram utilizadas duas montagens diferentes de AmpOp, as primeiras foram criadas de forma a ler os valores provenientes dos sensores de tensão e a outra montagem foi feita de forma a ler, amplificar e filtrar os valores recebidos dos sensores de corrente. As duas montagens são bastante semelhantes, diferindo apenas na resistência de medida dos sensores e nos ganhos. O diagrama esquemático desta montagem pode ser visualizado na Figura 4.9.

A entrada do sistema de condicionamento de sinal é dada pelo valor lido no sensor (Sensor). A resistência R_S é igual a zero para que não interfira com o sinal de entrada, sendo este dado por um sensor com resposta em corrente. A resistência de medida, R_M , é responsável por dar a resposta em tensão proporcional a corrente fornecida pelo sensor, como já foi visto na caracterização dos sensores. As resistências R_{G1} e R_{G2} são responsáveis pelo ganho da montagem, o cálculo deste parâmetro foi concebido seguindo a equação 4.2, em que G é o ganho e R_{G1} e R_{G2} são as resistências de ganho, como já foi mencionado. É muito importante referir que o dimensionamento deste circuito foi realizado com o máximo de atenção possível, pois a resistência de medida do sensor fica em paralelo com a resistência R_{G1} . Desta forma para que as leituras realizadas pela placa de desenvolvimento não sejam afetadas por este facto, a resistência R_{G1} necessita possuir um valor muito superior ao valor de R_M , para que o valor da tensão lida por estas seja realmente proporcional ao valor de entrada de cada sensor. Os valores dos componentes utilizados para realizar a amplificação das tensões e das correntes lidas podem ser visualizados na Tabela 4.4.

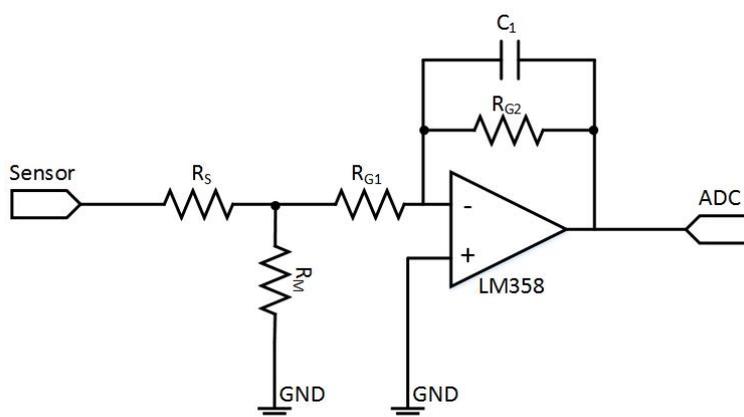


Figura 4.9 - Esquema eletrônico da montagem amplificadora para a placa de condicionamento de sinal.

Tabela 4.4 - Valores dimensionados para as resistências das montagens amplificadoras.

Leitura do Sensor	R_S (Ω)	R_M (Ω)	R_{G1} (k Ω)	R_{G2} (k Ω)
Tensão	0	100	9,1	13
Corrente	0	33	10	20

Este processo no seu todo só foi possível de realizar tendo em conta que o ADC escolhido permite realizar leituras de valores de tensão positiva e negativa, ou seja, o ADC permite realizar leituras de valores analógicos entre -5 a 5 V. Visto que o ADC que está integrado na placa de desenvolvimento só permite a leitura de valores analógicos entre 0 e 3,3 V, teve de ser adquirido um que cumprisse os requisitos requeridos. O ADC escolhido para este sistema de monitorização foi o MAX1320, que foi obtido da empresa americana Maxim Integrated.

O ADC MAX1320 possui uma resolução de 14 bits e permite efetuar leituras de valores entre -5 e 5 V, permitindo distintas configurações de leitura, ou seja, permite ler um canal, dois, quatro ou oito canais independentes com uma penalização no tempo de conversão. Por exemplo, se for lido apenas um canal este realiza a sua conversão em apenas 1,6 μ s, mas se forem lidos oito canais, que é o caso da configuração selecionada, necessita de 3,7 μ s para realizar a conversão dos valores analógicos para valores digitais. A configuração de oito canais permite realizar a leitura a 250 ksp/s/ch (duzentas e cinquenta mil amostras por segundo por cada canal) [44]. Para ser possível configurar e receber os valores provenientes deste ADC foi utilizada uma ficha de 26 pinos em que a placa de desenvolvimento tem acesso aos pinos de configuração e aos pinos de leitura dos valores digitais fornecidos por este. Na Figura 4.10 encontra-se a configuração dessa mesma ficha e a Tabela 4.5 complementa a informação desta figura sobre os pinos de ligação do ADC e onde estes estão conectados na placa de desenvolvimento.

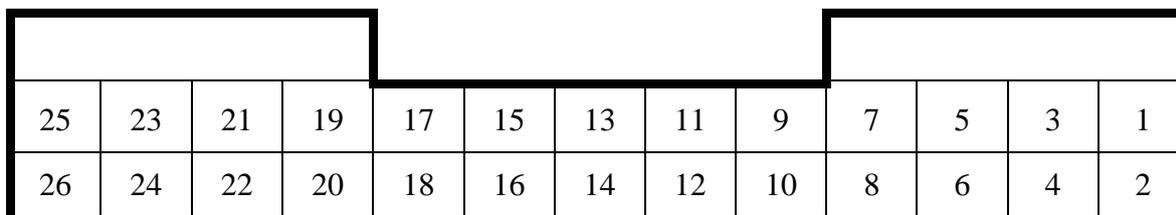


Figura 4.10 - Esquemático da ficha de conexão da placa de ADC com a placa de desenvolvimento.

Tabela 4.5 - Descrição dos pinos da ficha do ADC e respetivo acoplamento à placa de desenvolvimento.

Pino	Pino ADC-Designação	Pino DSP (designação)
1	DGND	DGND
2	DGND	DGND
3	24 – D0	GPIO0
⋮	⋮	⋮
16	37 – D13	GPIO13
17	45 – MASTER CONVST	GPIO22
18	42 – MASTER /RD	GPIO21
19	43 – MASTER /WR	+3,3 V
20	40/41 – MASTER /EOLC /EOC	GPIO23
21	Reservado	Reservado
22	Reservado	Reservado
23	Reservado	Reservado
24	Reservado	Reservado
25	+3,3 V	+3,3 V
26	+3,3 V	+3,3 V

Por último, foram incluídos numa PCB o sistema de condicionamento de sinal e o ADC, com as devidas interligações. Este sistema possibilita a leitura de oito sensores em paralelo, devido a isso foram dimensionados 8 sistemas de condicionamento de sinal, quatro para ler os valores resultantes dos sensores de tensão e os outros quatro para os sensores de corrente, embora só sejam utilizados sete canais porque a corrente de neutro é calculada por software. Para fazer a interface entre a PCB e os sensores foram utilizados conectores em cascata de quatro entradas cada um, esta forma permite ler o valor resultante dos sensores e alimentar a ala secundária dos mesmos. A placa desenvolvida, que pode ser visualizada na Figura 4.11,

ainda usufrui de um conector de três pinos para a alimentação da mesma, esta deve ser feita por uma tensão de -15 V, a massa e a tensão de 15 V.



Figura 4.11 - Resultado final da placa de condicionamento de sinal e de ADC.

4.2.4 Placa de Desenvolvimento

Para a aquisição de sinal e tratamento dos dados recolhidos pelos sensores foi utilizada uma placa de desenvolvimento da Texas Instruments, modelo *F28M35H52C1*. Esta possui um SoC (*System on Chip*) com um DSP (*Digital Signal Processor*) C28 e um processador ARM (*Advanced RISC Machine*) M3. O DSP incluído no chip desta placa de desenvolvimento possui uma frequência de relógio de 150 MHz e dois tipos de memórias para armazenar informação: uma memória não volátil, ou seja, uma memória *flash* de 512 kB, e três memórias voláteis, uma RAM (*Random Access Memory*) de 36 kB, uma memória partilhada, ou seja, uma *shared* RAM de 64 kB e uma memória para a comunicação inter-processador, sendo esta a IPC (*Interprocessor Communications*) *message* RAM. Este possui ainda múltiplas interfaces para comunicações com outros sistemas, sendo estas a SCI (*Serial Communications Interface*), a SPI (*Serial Peripheral Interface*) e o I2C (*Inter-integrated Circuit*). O mesmo contém também 2 *timers* de 32 bits, uma FPU (*Floating-Point Unit*) e 18 saídas de ePWM (*Enhanced Pulse Width Modulator*), dezasseis das quais são de alta resolução [45].

O processador ARM M3 constituinte desta placa de desenvolvimento possui uma frequência de relógio máxima de 100 MHz e dois tipos de memórias, como foi visto na descrição do DSP, todas com a mesma configuração que o anterior, à exceção da memória RAM que possui uma capacidade de 32 kB. Este processador contém múltiplas interfaces de troca de dados com sistemas externos, cinco portas UART (*Universal Asynchronous*

Receiver/Transmitter), quatro portas SSI (*Synchronous Serial Interface*), duas portas I2C e duas portas CAN (*Controller Area Network*). Este ainda inclui quatro *general-purpose timers* e dois *watchdog timer modules*. Todas as interfaces e periféricos facultados pelo DSP e pelo processador ARM podem ser revistos no diagrama esquemático da Figura 4.12.

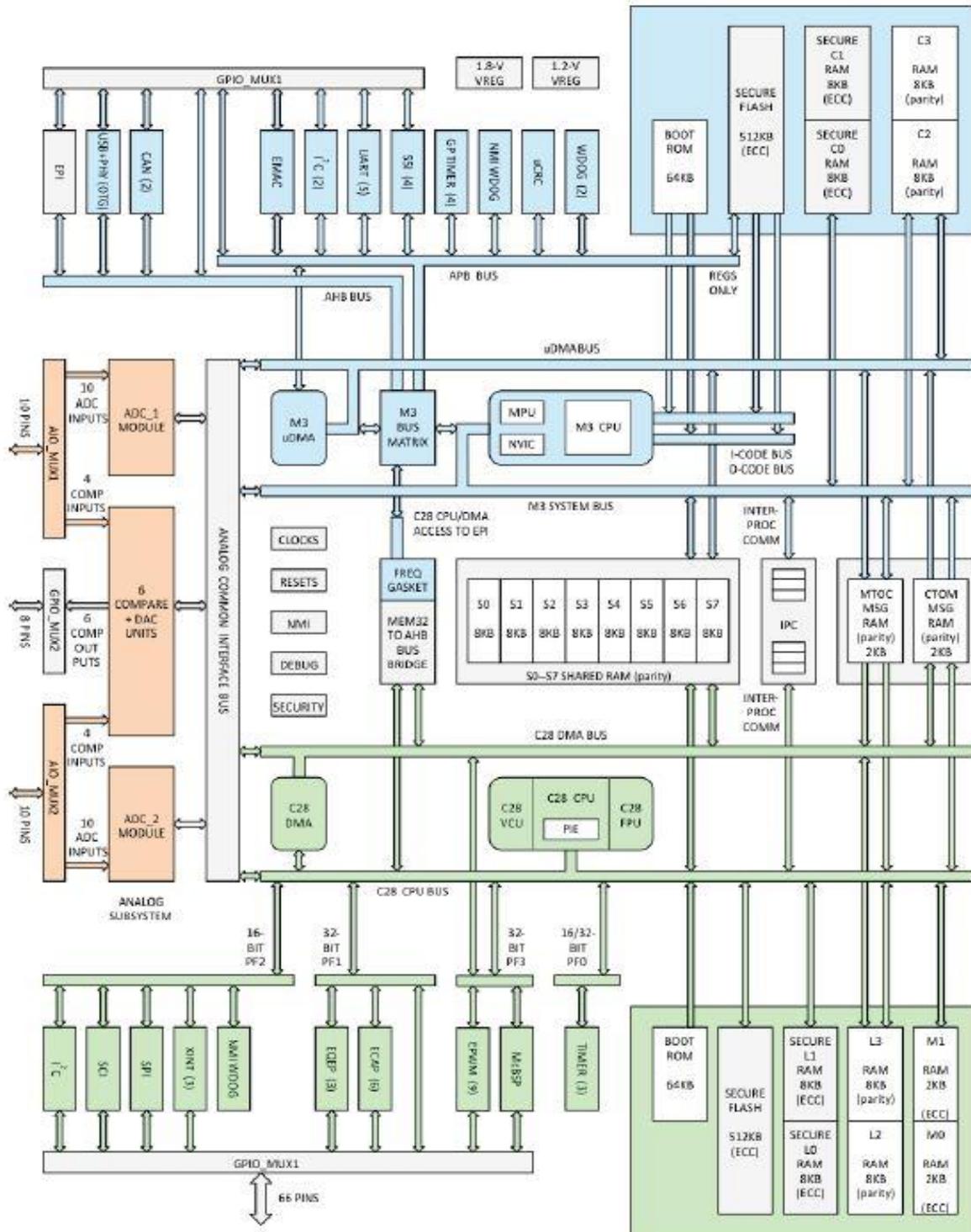


Figura 4.12 - Mapa de periféricos da placa de desenvolvimento [45].

Para além de todos os periféricos que foram descritos nos dois parágrafos anteriores e dos que estão presentes na Figura 4.12, na placa de desenvolvimento esta incluída uma porta Ethernet 10BASE-T e 100BASE-TX/RX IEEE 802.3. Esta é responsável pela comunicação de dados com a *Raspberry Pi 3B*, fazendo uma comunicação bidirecional entre os dois sistemas. A *Raspberry Pi* é responsável pelo envio de tramas de comando e a placa de desenvolvimento fica encarregue de responder a essas tramas de comando com tramas de dados. Estas tramas de comando e de dados são descritas em pormenor na descrição do software implementado. Nesta placa de desenvolvimento encontra-se ainda disponível uma *socket* micro SD (*Secure Digital*) para que seja possível incluir uma memória *flash* externa, ou seja, com esta *socket* é possível acoplar um cartão de memória de forma a estender a capacidade de memória da placa de desenvolvimento, este sistema está preparado para suportar ficheiros sob o formato FAT (*File Allocation Table*) [45].

Para a integração da placa de desenvolvimento neste projeto foi necessário recorrer a uma *dock station* desenvolvida pela Texas Instruments. Esta possui um programador próprio para que seja possível carregar o programa compilado no CCS na placa de desenvolvimento. Esta fica ainda responsável por deixar disponíveis os pinos de entrada e saída (GPIO - *General Purpose Input/Output*) de dados da placa. Na Figura 4.13 é possível visualizar a placa de desenvolvimento já integrada na sua *dock station*.

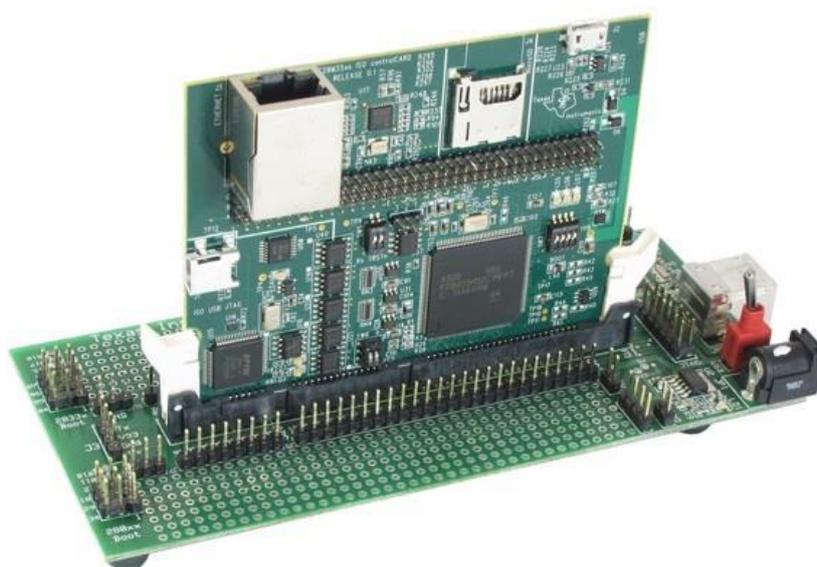


Figura 4.13 - Placa de desenvolvimento (F28M35H52C1), incluída na sua *dock station*.

Nesta placa de desenvolvimento encontra-se disponível um barramento de ligações que fica responsável por conectar alguns periféricos ao processador ARM ou ao DSP. Este barramento é responsável por conectar a porta Ethernet ao processador ARM M3, como se verifica na Figura 4.14.

		F28M35xx -cCard		Revision 1.1			
A_Row		B_Row		C_Row			
To DIMM 100 Connector		F28M35xx or DIMM		To Connectivity by ports			
Connects to DIMM 100 compatible signal map	C28_GPIO49	Jumper positions	1	PH1_GPIO49	Jumper positions	M3_MII_RXD0	
	C28_GPIO30		2	PE6_GPIO30		M3_MII_MDIO	
	C28_GPIO40		3	PG0_GPIO40		M3_MII_RXD2	
	C28_GPIO41		4	PG1_GPIO41		M3_MII_RXD1	
	C28_GPIO43		5	PG3_GPIO43		M3_MII_RXDV	
	C28_GPIO51		6	PH3_GPIO51		M3_MII_TXD2	
	C28_GPIO54		7	PH6_GPIO54		M3_MII_TXEN	
	C28_GPIO55		8	PH7_GPIO55		M3_MII_TXCK	
	C28_GPIO56		9	PJ0_GPIO56		M3_MII_RXER	
	C28_GPIO58		10	PJ2_GPIO58		M3_MII_RXCK	
	C28_GPIO59		11	PJ3_GPIO59		M3_MII_MDC	
	C28_GPIO60		12	PJ4_GPIO60		M3_MII_COL	
	C28_GPIO61		13	PJ5_GPIO61		M3_MII_CRS	
	C28_GPIO62		14	PJ6_GPIO62		M3_MII_PHYNTRn	
	C28_GPIO63		15	PJ7_GPIO63		M3_MII_PHYRSTn	
	C28_GPIO32	16	PF0_GPIO32	M3_PFO/CAN1RX	CAN0/1		
	C28_GPIO33	17	PF1_GPIO33	M3_PFI/CAN1TX			
	C28_GPIO6	18	PA6_GPIO6	M3_PA6/CAN0RX			
	C28_GPIO31	19	PE7_GPIO31	M3_PA7/CAN0TX	I2C		
	C28_GPIO14	20	PB6_GPIO14	M3_I2C0SDA			
	C28_GPIO15	21	PB7_GPIO15	M3_I2C0SCL	SSI		
	C28_GPIO16	22	PD0_GPIO16	M3_SSI0TX			
	C28_GPIO17	23	PD1_GPIO17	M3_SSI0RX			
	C28_GPIO18	24	PD2_GPIO18	M3_SSI0CIK			
	C28_GPIO19	25	PD3_GPIO19	M3_SSI0Fss	DIMM IO options		
	C28_GPIO54	26	DIMM_pin 20	C28_GPIO60			
	C28_GPIO55	27	DIMM_pin 70	C28_GPIO61			
	C28_GPIO56	28	DIMM_pin 22	C28_GPIO62			
	C28_GPIO57	29	DIMM_pin 72	C28_GPIO63	USB		
	C28_GPIO57	30	PJ1_GPIO57	M3_USB0FLT			
	C28_GPIO42	31	PG2_GPIO42	M3_USB0DM	Un_muxed signals		
Un_muxed signals	PC4_GPIO68/MII_RXD3	Do not populate	32	PG5_GPIO45/USB0DP		Do not populate	PF5_GPIO37/MII_RXD0
	PH4_GPIO52/MII_TXD1		33	PF6_GPIO38/USB0VBUS			PH5_GPIO53/MII_TXD0
	PG6_GPIO46/USB0ID		34	PC5_GPIO69/USB0EPEN			PG7_GPIO47/MII_TXER
	NC		35	GND			NC
	3,3 V		36	NC	5 V		

DIMM signal / Peripheral functions are active if Jumper selections are placed per the color code

Figura 4.14 - Barramento presente na placa de desenvolvimento para conexão dos periféricos [48].

4.2.5 Raspberry Pi 3B e Monitor

A interface gráfica é um requisito base de um sistema de monitorização, pois este possibilita a troca de informação com o utilizador. Para preencher este requisito do projeto foi adquirido um LCD, para apresentar ao utilizador os dados selecionados, e uma *Raspberry Pi 3* modelo B, para executar o código da interface gráfica.

A *Raspberry Pi 3* modelo B foi um sistema criado por a Raspberry Pi Foundation. Esta entidade, para além da criação desta plataforma, ainda oferece gratuitamente o *Raspbian*, um sistema operativo baseado no *Debian*. Embora este sistema operativo tenha sido otimizado para funcionar na *Raspberry Pi*, encontra-se em constante desenvolvimento de forma a torná-lo mais estável e com uma melhor performance [46].

Esta plataforma possui um SoC da Broadcom, o BCM2837, que contém o processador ARM Cortex-A53 de 64 bits com uma frequência de 1,2 GHz de quatro núcleos (*quad-core*), um módulo de Bluetooth 4.1 com Bluetooth clássico e BLE (*Bluetooth Low Energy*), e um módulo de 802.11n *Wireless LAN*. Possui ainda uma GPU (*Graphics Processing Unit*) *dual core videocore IV multimedia co-processor*. Esta é constituída por uma RAM de 1 GB, 4 portas USB, 40 pinos GPIO, uma porta HDMI (*High-Definition Multimedia Interface*), uma porta Ethernet 10/100 BaseT, um canal SPI e um canal I2C. Embora esta possua uma enorme gama de periféricos é muito compacta, possuindo um tamanho de apenas 85 mm por 56 mm [46].

A interface gráfica do sistema de monitorização deste trabalho foi produzida na sua totalidade no *Qt-Linux*, instalado no sistema operativo *Ubuntu*; no entanto, foi utilizado o método de *cross-compile* para que o software fosse compilado no *Ubuntu* e criasse um executável que corria diretamente na plataforma escolhida. Este método de compilação foi selecionado porque a plataforma escolhida não sustenta todas as versões do *Qt-Linux* e possui uma velocidade de processamento muito inferior à de um computador *desktop*, o que acaba por compensar produzir o software utilizando esta técnica de programação. Na Figura 4.15 está evidenciada a plataforma selecionada para a execução do ambiente gráfico do sistema de monitorização.

A interface entre o utilizador e o sistema de monitorização é feita através de um monitor da *Lilliput*. Este monitor possui uma tela de 7 polegadas e uma resolução de imagem de 16:9, tendo a capacidade de reproduzir imagens até a uma resolução máxima de 1080p. Este monitor possui múltiplas interfaces de conexão de vídeo, sendo que duas delas são entradas

digitais, a entrada HDMI e a entrada DVI (*Digital Visual Interface*), e duas entradas analógicas, a entrada VGA (*Video Graphics Array*) e uma entrada *Composite vídeo* [47].

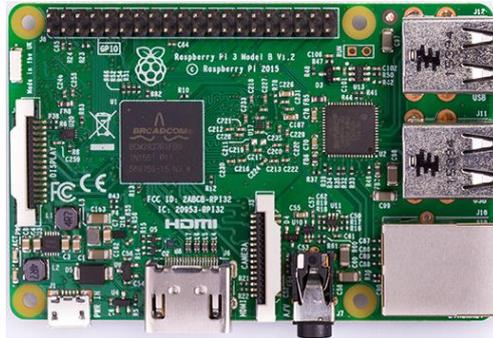


Figura 4.15 - *Raspberry Pi 3* modelo B.

4.2.6 Resultado Final

Por fim, na Figura 4.16 encontra-se a montagem de todo o hardware do sistema de monitorização de QEE desenvolvido ao longo deste trabalho. O hardware desenvolvido para este projeto foi todo colocado dentro de uma caixa, com a finalidade de facilitar a portabilidade do mesmo, com exceção do LCD e dos sensores de corrente utilizados. Ao longo da descrição do hardware não foi referida a montagem do RTC, porque este será revisto no próximo subcapítulo.

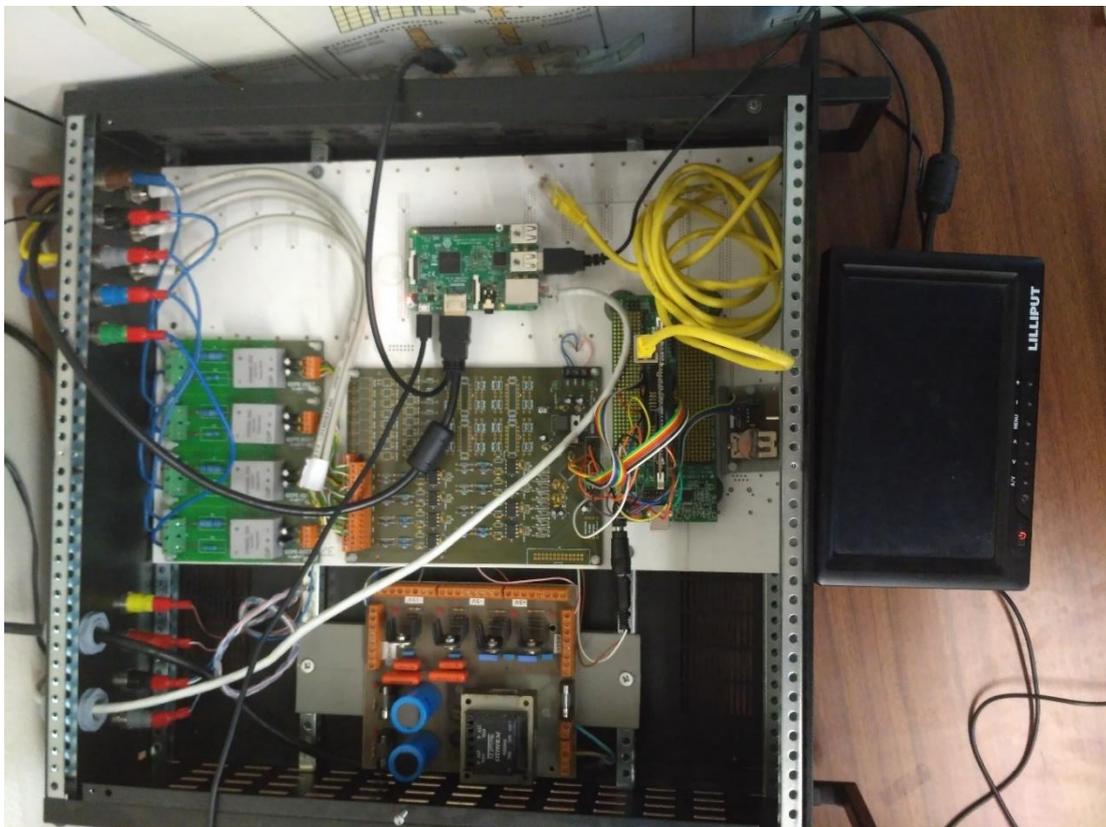


Figura 4.16 - Montagem de todo o hardware do sistema de monitorização.

4.3 Software

Como já foi descrito ao longo da secção anterior, o software criado para este sistema de monitorização de QEE possui várias componentes distintas. Estas componentes estão dependentes das plataformas para as quais foram criadas. Com isto é possível verificar que a aquisição de sinal é realizada por o ARM M3, que está inserido na placa de desenvolvimento, o cálculo de todos os parâmetros de QEE é realizado pelo DSP C28, que se apresenta também inserido na placa de desenvolvimento, e a interface gráfica foi criada para ser executada na *Raspberry Pi*. Para a realização do software dos dois processadores incluídos na placa de desenvolvimento foi utilizado o CCS e para a realização da interface gráfica foi utilizado o *Qt-Linux*. Por fim, são também descritas as tramas de dados e de controlo utilizadas de forma a explicar como foi possível realizar a interface entre a placa de desenvolvimento e a *Raspberry Pi*.

4.3.1 Aquisição de Sinal

A aquisição de sinal foi realizada a partir do processador ARM M3, incluído na placa de desenvolvimento escolhida. Este processador, como foi referido anteriormente na descrição do seu hardware, possui uma alargada gama de periféricos disponíveis, facilitando deste modo a aquisição e a transmissão de dados.

Os dados que são recolhidos pelos sensores analógicos passam por uma placa de condicionamento de forma a serem amplificados e filtrados, sendo posteriormente encaminhados para um canal de ADC disponível, que é responsável por ler os valores analógicos e convertê-los em valores digitais. O processador utilizado disponibiliza dezassete pinos, três pinos para comunicar com o ADC e catorze pinos para ler os valores disponibilizados, visto que o ADC possui uma resolução de 14 bits. Este disponibiliza ainda um *timer* para gerar, através de um GPIO, um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) e desta forma informar o ADC que pode realizar mais uma conversão de valores, através de um processo conhecido como CONVST (*Convert Start*). No fim da conversão de valores o ADC está diretamente conectado a um GPIO que é responsável por gerar uma interrupção externa, onde é feita a aquisição dos sete sinais, quatro sinais de tensão e três de corrente. O processo que gera esta interrupção é conhecido como EOLC (*End Of Last Conversion*). De forma a possibilitar a leitura de todos os valores é necessário que o processador informe o ADC que já está pronto para receber novos dados. O pino RD (*Read*) é disponibilizado com a função de avisar o ADC que o micro já se encontra disponível para receber a leitura do próximo

canal. Na Figura 4.17 encontra-se um gráfico temporal que demonstra o processo acima descrito.

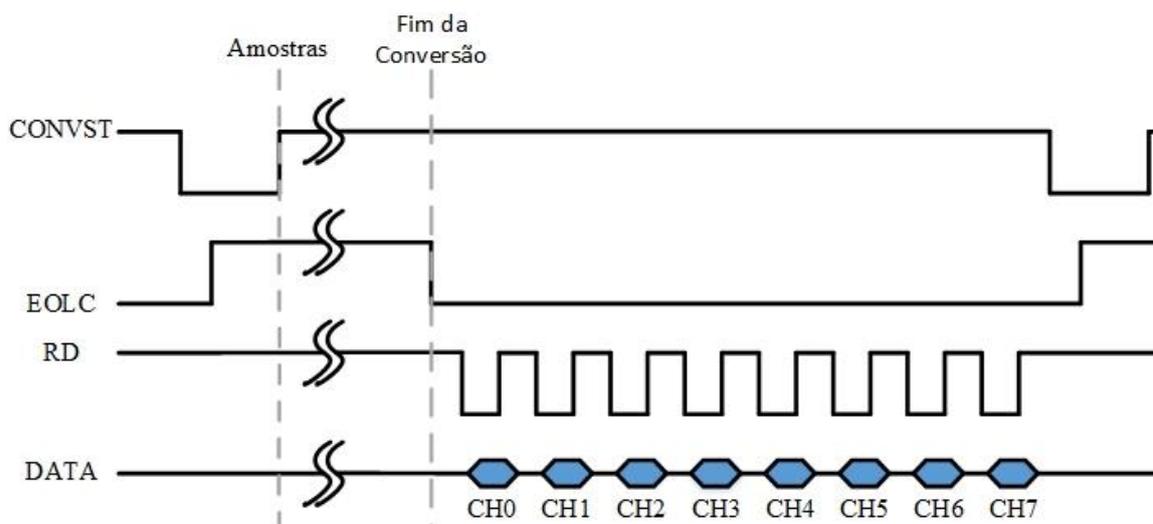


Figura 4.17 - Esquemático temporal de leitura de dados do ADC externo.

A aquisição de sinal é um processo essencial no desenvolvimento de um sistema deste género, no entanto, não é o único processo executado no ARM M3 que merece referência. Existem outros processos executados por este processador, dos quais se destacam a obtenção de dados de um RTC, a comunicação Ethernet com a interface gráfica, a deteção de eventos de QEE, a gravação destes eventos em memória não volátil, a leitura destes eventos quando estes são pedidos pelo utilizador e a comunicação inter-processador com o C28.

A comunicação de dados com o DSP C28 é feita através de uma memória partilhada, *shared RAM*, de uma CTOM MSG RAM (*C28 to M3 Message RAM*), de uma MTOC MSG RAM (*M3 to C28 Message RAM*) e de uma memória RAM alocada para comandos, sendo esta a IPC.

A memória *shared RAM* é uma memória partilhada pelos dois processadores que possibilita a leitura e a escrita de dados tanto pelo DSP C28 como pelo ARM M3. Neste trabalho a memória partilhada foi utilizada para partilhar todas as amostras lidas pelos sensores. Estas amostras, como foi referido anteriormente, são recolhidas pelo processador ARM e são endereçadas na *shared RAM*, possibilitando o acesso aos dados por parte do DSP, para que este possa realizar os cálculos dos parâmetros inerentes aos sinais recolhidos.

Neste projeto foi também utilizada a memória CTOM MSG RAM com uma função fundamental na comunicação de dados entre o DSP e o ARM, que consiste em partilhar todos os parâmetros calculados pelo DSP com o processador ARM, para que este possa ter acesso aos parâmetros adjacentes aos sinais. Posto isto, é necessário que o DSP C28 saiba quando

tem de calcular os parâmetros dos sinais recolhidos e é crucial também que o processador ARM M3 saiba quando é que estes cálculos estão prontos, de forma a não introduzir erros nas mensagens enviadas para a interface gráfica. Para sincronizar os dois processadores existe a memória IPC, que disponibiliza um enorme gama de configurações. Esta memória disponibiliza todos os seus bits com *flags* de sinalização de processos, e permite testar estas *flags* por *polling* ou por interrupções, dependendo da configuração que mais se adequa a cada processo. Neste caso em concreto estas *flags* foram testadas por *polling*, porque para esta configuração é este o método que mais se apropria.

Segundo a norma NP EN 50160 uma cava de tensão necessita possuir uma atenuação do valor eficaz da tensão entre 10% e 90% da tensão nominal e persistir por mais de meio ciclo de rede. Neste caso específico necessita de se propagar por mais de 10 ms, visto que a frequência fundamental da rede elétrica é de 50 Hz. Uma sobretensão momentânea necessita elevar a tensão nominal a mais de 10% do seu valor nominal e intensificar-se por um período mínimo de 10 ms. Uma interrupção de energia corresponde a uma diminuição do valor da tensão nominal a menos de 10% do seu valor e persistir por mais de 10 ms. Posto isto, estão reunidas características suficientes para se poder avaliar os três tipos de eventos de QEE referidos [5].

Neste projeto é possível detetar alguns eventos de QEE, nomeadamente os eventos descritos no parágrafo anterior. Para tal, foi necessário recorrer a alguns recursos da placa de desenvolvimento, nomeadamente ao DSP, que executa os cálculos do valor eficaz das tensões, ao IPC, para informa o processador ARM sobre o momento que deve fazer o teste de eventos de QEE, e ao processador ARM, para realizar os testes de QEE. Se for detetado algum evento são gravados em memória não volátil, no cartão de memória micro SD, alguns parâmetros sobre o evento ocorrido, mais precisamente é gravada a data e a hora da ocorrência, o tipo de evento, a fase em que ocorreu, o tempo de propagação e o valor eficaz mais distante do valor nominal da tensão. Para conseguir perceber-se de uma forma mais eloquente o processo descrito é apresentada a Figura 4.18, que esquematiza o assunto referido.

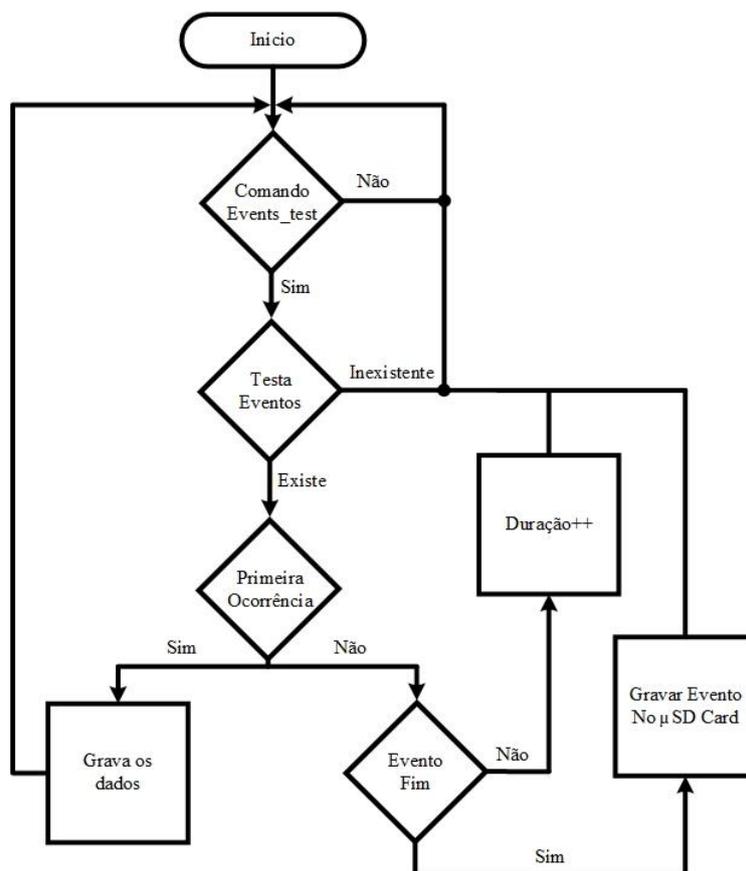


Figura 4.18 - Fluxograma para a função de detetar eventos de QEE.

Por fim, foi acoplado ao processador ARM um RTC, que comunica via I2C com o processador. Este RTC é responsável por sincronizar todos os processos em tempo real, dando informação sobre o dia, o mês, o ano, o dia da semana, a hora, os minutos e os segundos. Posto isto, é necessário que o processador ARM faça um pedido de dados ao RTC para que este lhe envie todos os dados já descritos. Para conseguir que os dados sejam o mais fidedignos possível a atualização destes valores é feita ao segundo, ou seja, o processador pede ao RTC a informação sobre a hora de segundo em segundo, sincronizando assim os processadores com um erro inferior a um segundo.

4.3.2 Cálculo dos Parâmetros de Qualidade de Energia Elétrica

O cálculo dos parâmetros de QEE é executado pelo DSP C28 existente na placa de desenvolvimento, devido a este possuir uma maior velocidade de processamento, como é característica dos sistemas deste género, do que o processador ARM. Neste caso específico o DSP detém uma frequência de relógio máxima de 150 MHz. Por outro lado, este sistema já contém uma FPU, facilitando desta forma o cálculo de parâmetros que necessitem de um cálculo decimal, como é o caso do cálculo da FFT (*Fast Fourier Transform*) e da energia que o sistema está a consumir.

O valor médio de uma tensão sinusoidal corresponde à adição de uma componente CC ao sinal sinusoidal. O valor médio numa onda sinusoidal provoca assimetria de meia onda, este efeito deve-se substancialmente ao facto da onda sinusoidal, quer da corrente quer da tensão, possuir um ponto médio diferente de zero. Deste modo, a onda sinusoidal, que em condições ideais teria o semiciclo positivo igual ao módulo do semiciclo negativo, deixa de possuir os semiciclos positivo e negativo iguais em módulo.

Em tempo contínuo o valor médio da tensão pode ser avaliado através da equação 4.5.

$$V_{mean} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad 4.5$$

Em tempo discreto o valor médio pode ser calculado através da expressão 4.6.

$$V_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[n] \quad 4.6$$

O valor eficaz ou RMS (*Root Mean Square*) da tensão e da corrente estão diretamente conectados com a potência fornecida por estas duas componentes. Em termos físicos pode-se comparar o valor eficaz de um sinal CA a um sinal CC, pois o valor eficaz de um sinal periódico representa a mesma energia dissipada por uma resistência comparativamente com um sinal CC com o mesmo valor [48].

Em tempo contínuo o valor eficaz pode ser avaliado com a aplicação da equação 4.7.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad 4.7$$

Em tempo discreto o valor eficaz é possível de calcular se for seguida a equação 4.8.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v^2[n]} \quad 4.8$$

A potência ativa é a variável do sistema que é responsável por produzir trabalho, ou seja, é a potência que a carga necessita para funcionar em perfeitas condições. Por exemplo, se a carga do sistema for puramente resistiva esta só necessita de potência ativa, porque o desfasamento total entre a tensão e a corrente é nulo. Por outro lado, se a carga for indutiva ou capacitiva esta consome também potência reativa, logo o desfasamento total entre a tensão e a corrente é diferente de 0° . Devido a isto, estas cargas necessitam de potência ativa, que é responsável

pelo trabalho da carga, e trocar com a fonte, ou com outro sistema auxiliar de alimentação, potência reativa [48].

A potência ativa em tempo contínuo pode ser calculada utilizando os valores eficazes da tensão e da corrente e o fator de potência total ($\cos(\varphi)$), em que φ é o desfasamento total entre a tensão e a corrente, como se verifica na equação 4.9.

$$P = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\varphi) \quad 4.9$$

Por outro lado, a potência ativa em tempo contínuo pode ainda ser calculada utilizando a equação 4.10.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt \quad 4.10$$

A potência ativa pode ser calculada em tempo discreto para isso é necessário recorrer ao algoritmo imposto pela equação 4.11, onde v e i são valores instantâneos da tensão e da corrente, respetivamente.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[n] i[n] \quad 4.11$$

A potência aparente é o produto do valor eficaz da tensão pelo valor eficaz da corrente, logo é o total da potência que a carga necessita. Posto isto a potência aparente é a potência contratada às concessionárias de energia elétrica, esta também pode ser definida como a raiz quadrada da soma do quadrado da potência ativa com o quadrado da potência reativa [48].

A potência aparente pode ser calculada em tempo contínuo e em tempo discreto da mesma forma, para isso é necessário em primeiro lugar calcular o valor eficaz da tensão e da corrente. Na equação 4.12 depara-se com a fórmula que permite efetuar o cálculo da potência aparente.

$$S = V_{RMS} I_{RMS} \quad 4.12$$

A potência aparente em tempo contínuo ou em tempo discreto pode também ser calculada com recurso a equação 4.13, mas para isso é necessário conhecer os valores da potência ativa e da potência reativa.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad 4.13$$

A potência reativa é a potência que não é responsável por produzir trabalho, ou seja, esta potência é trocada entre a carga e a fonte. Esta potência é indesejada nos sistemas elétricos pelas concessionárias de energia elétrica, por isso que as empresas que necessitam de muita potência reativa são penalizadas nas faturas da energia elétrica. Por outro lado, esta potência é fácil de ser compensada localmente. Por exemplo, se uma empresa necessita de muita potência reativa de carácter indutivo basta acoplar à alimentação um banco de condensadores para produzirem potência reativa de carácter capacitivo, compensado deste modo a potência reativa indutiva que estava a ser trocada entre a fonte e a carga [48].

A potência reativa pode ser calculada em tempo contínuo pela equação 4.14, mas para isso é preciso conhecer os valores eficazes das tensões e das correntes e o ângulo do desfasamento total entre a tensão e a corrente em questão.

$$Q = V_{RMS} I_{RMS} \sin(\varphi) \quad 4.14$$

A potência reativa pode ser ainda calculada em tempo contínuo e em tempo discreto seguindo a equação 4.15, mas para isso é necessário conhecer os valores da potência ativa e da potência aparente disponíveis.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad 4.15$$

O fator de potência total (*TPF – Total Power Factor*) é dado pelo cosseno do ângulo de desfasamento (φ) entre a tensão e a corrente de um sistema elétrico [48]. Este pode ser obtido também através da razão da potência ativa pela potência aparente, como se pode comprovar através da aplicação da equação 4.16.

$$TPF = \frac{P}{S} \quad 4.16$$

O valor de pico de uma onda sinusoidal é o valor máximo da onda. Para poder averiguar qual o valor de pico dos sinais recolhidos pelo sistema de monitorização foi criado um algoritmo que verifica qual é a amplitude máxima dos sinais obtidos [48]. O algoritmo pode ser verificado no fluxograma da Figura 4.19.

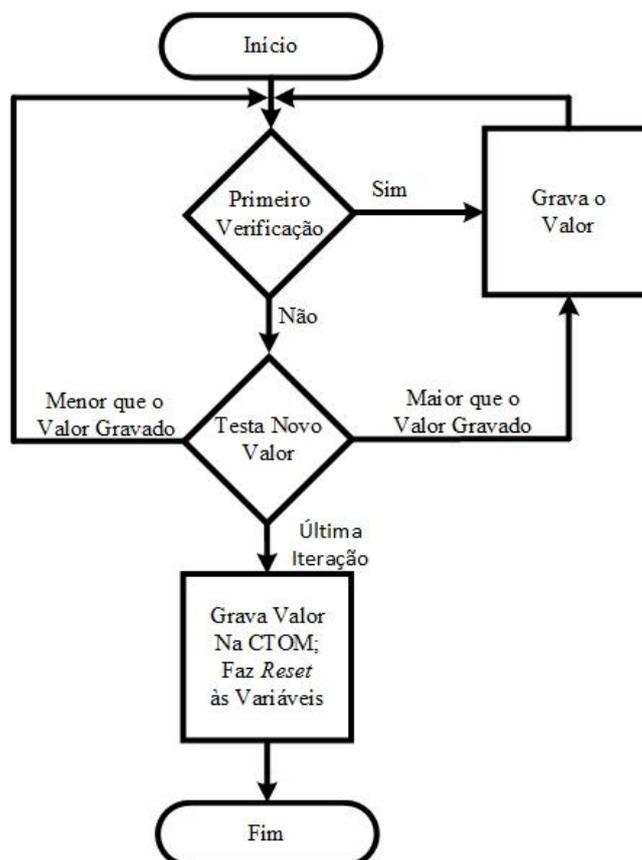


Figura 4.19 - Fluxograma para o cálculo do valor de pico do sinal lido.

A energia ativa é a energia que uma carga necessita para funcionar em perfeitas condições, esta é a energia absorvida pela carga que é responsável pelo trabalho da carga. Deste modo, a energia ativa pode ser calculada integrando a potência ativa num determinado período de tempo [48].

A energia ativa (E_a) de um sistema pode ser obtida através da equação 4.17. Para tal ser possível é necessário conhecer o valor da potência ativa fornecida à carga e o período de tempo de integração, sendo esta medida em kWh [48].

$$E_a = P \Delta t \quad 4.17$$

A energia reativa é a energia que é trocada entre a carga e a fonte de alimentação, esta pode ser ainda trocada com um sistema de alimentação auxiliar que produz a energia reativa que a carga necessita, deste modo sendo despenalizado na fatura de consumo de energia elétrica. Esta energia não é responsável pelo trabalho produzido pelas cargas elétricas. A energia reativa é medida em kVArh [48].

A energia reativa (E_r) pode ser obtida pela integração no tempo da potência reativa, como se pode verificar na equação 4.18.

$$E_r = Q \Delta t \quad 4.18$$

Neste projeto foi necessário ainda recorrer ao cálculo das amplitudes das harmónicas constituintes dos sinais recolhidos e das fases da tensão e corrente na componente fundamental do sistema (50 Hz). Este cálculo foi realizado com recurso a um algoritmo otimizado para o DSP C28, disponibilizado gratuitamente pela Texas Instruments. Este algoritmo deriva da FFT e é conhecido como RFFT (*Real Fast Fourier Transform*) [49] [50]. A fórmula geral adjacente ao algoritmo da FFT está presente na equação 4.19.

$$F[u] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f[u] e^{-j 2 \pi n/N} \quad 4.19$$

Na fórmula geral da FFT encontram-se algumas variáveis que merecem uma atenção especial, pois se estas forem mal introduzidas no algoritmo podem levar a erros nos cálculos. A variável N representa o número total de amostras por cada ciclo da rede elétrica, deve-se ter alguma atenção a introduzir o valor desta variável no algoritmo, visto que esta deve respeitar a igualdade proposta pela expressão 4.20, em que n tem de ser obrigatoriamente um número inteiro positivo [49] [50].

$$N = 2^n \quad 4.20$$

Neste projeto a frequência de amostragem foi definida a 25,6 kHz, que para uma frequência fundamental do sinal lido de 50 Hz resulta em 512 amostras por ciclo da rede elétrica. Posto isto, a RFFT pode ser calculada com o total das amostras obtidas por ciclo da rede elétrica. O algoritmo da RFFT retorna um vetor com $N - 1$ posições, neste vetor é possível identificar a amplitude e a fase de $N/2$ frequências harmónicas. Este algoritmo já possui a função necessária para o cálculo das amplitudes dos sinais com frequências harmónicas. Este contém também uma função para o cálculo das fases de cada harmónica, mas esta não foi utilizada neste projeto, porque esta demora mais tempo na sua execução do que aquele que foi previsto pela execução normal do programa. No entanto para ser possível calcular a fase na frequência fundamental do sinal lido foi utilizada a equação 4.21. É importante referir que esta equação foi adaptada ao vetor resultante do cálculo da RFFT, sendo que a variável $rfft_vec$ é esse mesmo vetor e Ph é a fase na fundamental.

$$Ph = \text{atan} \left(\frac{rfft_vec[N - 1]}{rfft_vec[1]} \right) \quad 4.21$$

A distorção harmónica total (*THD*) é o algoritmo que permite quantificar percentualmente o valor da distorção harmónica num sinal recolhido. Este valor é obtido em relação à amplitude

do sinal de frequência fundamental. O *THD* pode ser calculado através da equação 4.22, em que h é o valor da harmónica e H é o número total de harmónicas [48].

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H V_h^2}}{V_f} \quad 4.22$$

Para o cálculo de alguns parâmetros foi utilizado o princípio da janela deslizante, nomeadamente para o cálculo do valor eficaz, do valor médio, do valor de pico, da potência ativa, da potência reativa e da potência aparente. É importante referir que o cálculo destas variáveis foi executado seguindo as equações que foram descritas para o tempo discreto de cada um dos parâmetros. Esta janela possui um tamanho total de 512 amostras e desliza de dezasseis em dezasseis amostras. Numa primeira fase da execução do programa existe um carregamento das primeiras 512 amostras para dentro da janela, quando se verifica a receção destas amostras a janela vai se deslocar de dezasseis em dezasseis amostras. Para tal ser possível sem que interfira no resultado final dos cálculos foi necessário recorrer a dois apontadores, um deles para a posição inicial da janela e outro para a posição final, e de algumas variáveis globais de forma a gravar os valores dos somatórios imprescindíveis aos cálculos destes parâmetros. Na Figura 4.20 é possível ver o funcionamento de uma janela deslizante aplicado ao caso específico deste projeto. A figura facultada informação sobre duas fases da janela deslizante. Numa primeira fase esta carrega as 512 amostras, completando assim o tamanho da janela, esta primeira janela esta identificada com o número 1. Com o algoritmo 2 aparece a janela deslocada em dezasseis amostras, criando assim três zonas distintas, sendo estas apresentadas com os números 3, 4 e 5. Desta forma, com o algoritmo 3 aparece a zona que possui as dezasseis amostras a retirar do valor total previamente calculado, com o algoritmo 4 encontra-se a zona onde se situam as dezasseis amostras que se tem de adicionar ao valor atual, ou seja, já sem as amostras da zona 3 e, por último, surge o algoritmo 5, que possui a zona partilhada entre a primeira janela e a janela deslocada, ou seja, possui as amostras que são comuns às duas.

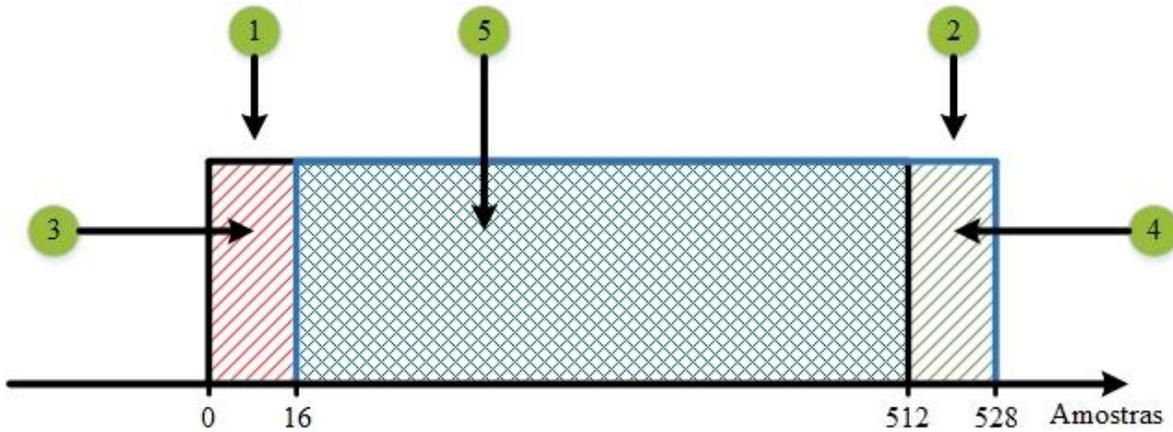


Figura 4.20 - Janela deslizante utilizada para o cálculo dos parâmetros.

4.3.3 Interface Gráfica

A interface gráfica desenvolvida para este sistema de monitorização de QEE foi toda desenvolvida no *Qt-Linux*, possibilitando assim a execução da aplicação da interface na *Raspberry Pi* adquirida. É importante referir que esta aplicação foi criada no sistema operativo *Ubuntu* e através do método de *cross-compile* foi criado um executável que pode ser executado no *Raspbian* (sistema operativo que foi instalado na *Raspberry Pi*). Posto isto, a aplicação possui alguns menus independentes, sendo estes o menu *Scope*, *Harm*, *Phase*, *Data*, *Energy*, *Events*, *Config* e o menu *Exit*, como se comprova na Figura 4.21.

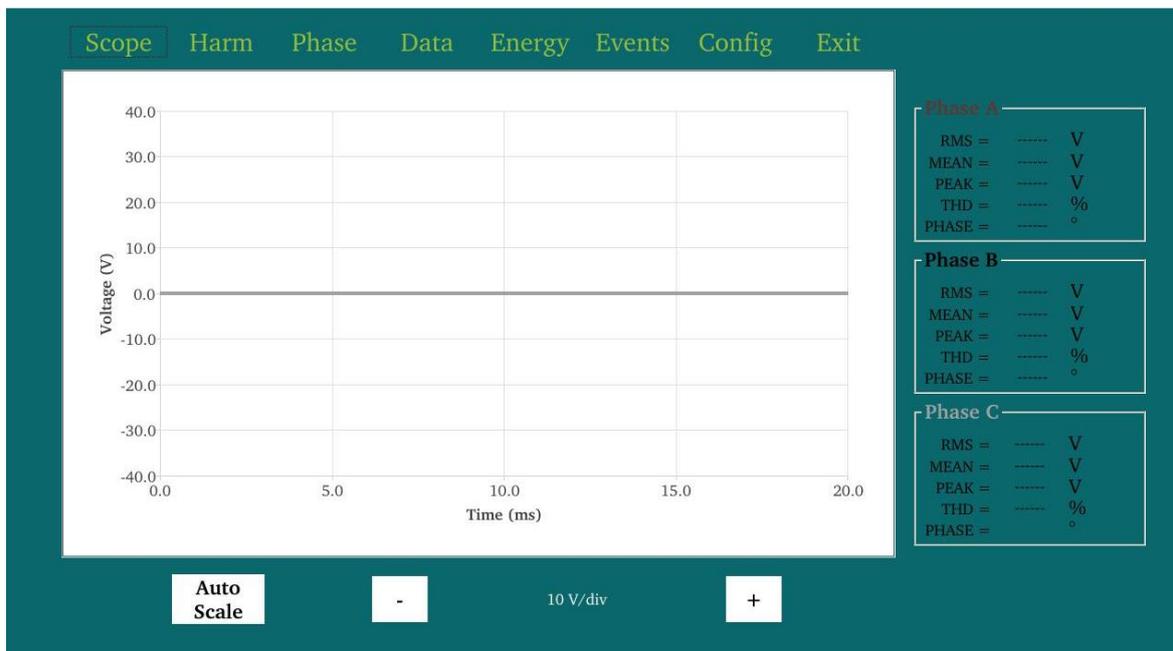


Figura 4.21 - Interface gráfica: menu *Scope*.

O menu *Scope* foi criado com o intuito de fornecer algumas informações sobre os sinais lidos, das quais se destacam o desenho dos gráficos de todos os sinais lidos, o valor eficaz, o valor

médio, o valor de pico, o THD e a fase de cada um dos sinais mostrados no gráfico traçado. É também possível visualizar as potências ativas, reativas e aparentes e o fator de potência total de cada uma das fases do sistema trifásico onde o sistema de monitorização foi integrado. Deste modo é possível visualizar a forma de onda das tensões e das correntes do sistema elétrico onde o sistema de monitorização está instalado, bem como alguns parâmetros sobre os sinais lidos.

Na Figura 3.21 também é possível visualizar o aspeto do menu *Scope*. Nesta figura é possível também visualizar a tela onde são traçadas as formas de onda dos sinais lidos e as secções onde está retida a informação sobre os sinais mostrados na tela. É relevante referir que este menu foi preparado para iniciar por omissão com a informação adjacente às três tensões lidas.

Neste menu é possível examinar as formas de onda de todos os sinais adquiridos. Para tal, foi criado um submenu no menu *Scope* em que se pode escolher os diferentes sinais que pretende visualizar, ou seja, as formas de onda e os parâmetros das tensões e das correntes. Para ser possível aceder a este submenu do sistema de monitorização é necessário deixar premida a tecla *Scope*, desta forma surge um submenu onde se pode ter acesso a todos os modos de operação que o menu oferece, como se verifica na Figura 4.22.

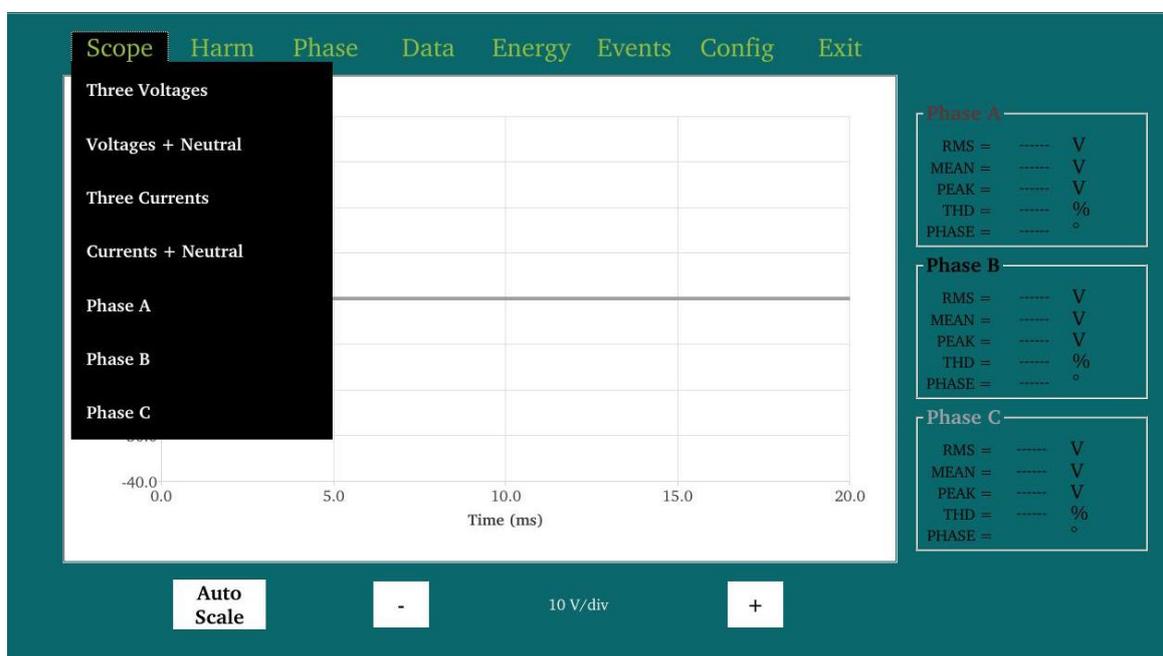


Figura 4.22 - Interface gráfica: menu *Scope* seleção do modo de operação pretendido.

Para o caso de ser seleccionada a informação sobre uma das fases do sistema trifásico surge na tela a forma de onda da tensão e da corrente da fase em questão. A forma de onda é complementada com a informação sobre o valor eficaz, o valor médio, o valor de pico, o THD e a fase da tensão e da corrente. Para além disto, aparece também uma caixa

suplementar que dá informação sobre as potências transferidas para a carga e o fator de potência total na fase selecionada. Esta informação pode ser validada com a visualização da Figura 4.23.

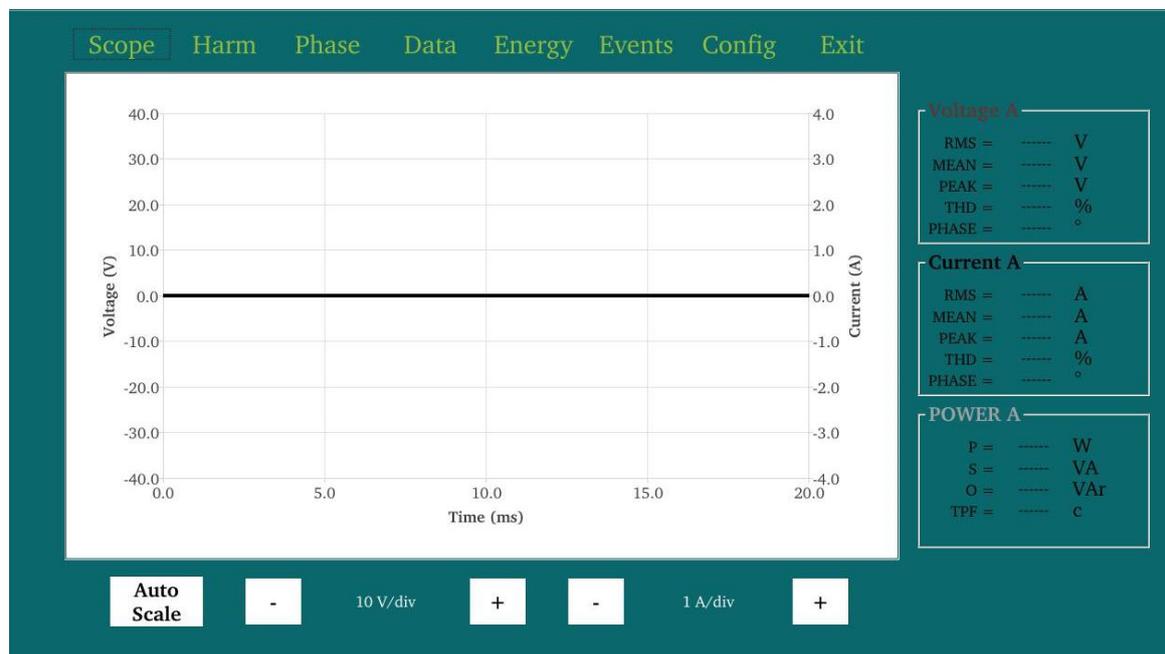


Figura 4.23 - Interface gráfica: menu *Scope* selecionando a corrente e a tensão numa das fases.

Para qualquer modo de operação do menu *Scope* é possível configurar a escala do gráfico, para isso é necessário clicar nos botões de escala que se localizam na parte inferior do gráfico. No caso em que o gráfico escolhido é o gráfico das três tensões, os botões que surgem na parte inferior do gráfico facultam a possibilidade de poder alterar as escalas das tensões. O mesmo se verifica quando na tela é mostrado o gráfico das correntes, pois apenas surgem os botões que possibilitam alterar a escala das correntes. Quando é selecionado o gráfico da tensão e da corrente numa das fases, na parte inferior do gráfico aparecem os botões necessários para alterar as escalas na tensão e na corrente. Este menu ainda faculto o ajuste automático das escalas dos sinais mostrados na tela, para tal é necessário clicar no botão *Auto Scale*, que por sua vez ajusta as escalas dos gráficos mostrados. Por fim, no caso de se sair do menu *Scope* para outro menu qualquer, o ajuste das escalas é gravado para que quando este menu for novamente selecionado se possam ver as formas de onda com a escala anteriormente selecionada.

É de extrema importância salientar que todos os valores do menu *Scope*, inclusive os gráficos traçados, são atualizados de 640 em 640 ms. Esta taxa de renovação de dados foi definida desta forma para que fosse possível distinguir os valores lidos sem que fosse perdida informação sobre os sinais mostrados.

O menu *Harm* foi criado para fornecer dados sobre as frequências harmónicas que constituem o sinal lido. Este à semelhança do menu anterior possui uma tela na qual é disponibilizado um gráfico com as amplitudes das harmónicas constituintes dos sinais lidos. Este menu como já foi referido foi formulado para oferecer a informação sobre as harmónicas, posto isto é imprescindível que este possua informação sobre o THD do sinal.

Na Figura 4.24 é possível observar a tela inicial do menu *Harm*. Nesta figura identificar-se claramente o local na tela onde são representadas graficamente as amplitudes das harmónicas do sistema e onde surge a informação sobre o THD, parâmetro este que contém a informação sobre a distorção harmónica total em relação ao valor na frequência fundamental do sinal lido. Este, tal como o que o antecede, foi programado, por omissão, para fornecer informação sobre as três tensões do sistema elétrico.



Figura 4.24 - Interface gráfica: menu *Harm*.

Neste menu é possível selecionar a informação que se pretende visualizar na tela, para tal foi criado um submenu que possibilita trocar os dados disponibilizados na tela deste. Para aceder a este submenu é necessário deixar premido o botão que dá acesso ao menu. Quando o submenu surge é necessário um clique para selecionar a informação que se pretende visualizar na tela. A Figura 4.25 esclarece a afirmação anterior, adicionando ainda as possíveis configurações que se podem obter através deste submenu, sendo estas as harmónicas das três tensões, das três correntes ou as harmónicas da tensão e da corrente por cada uma das fases do sistema.

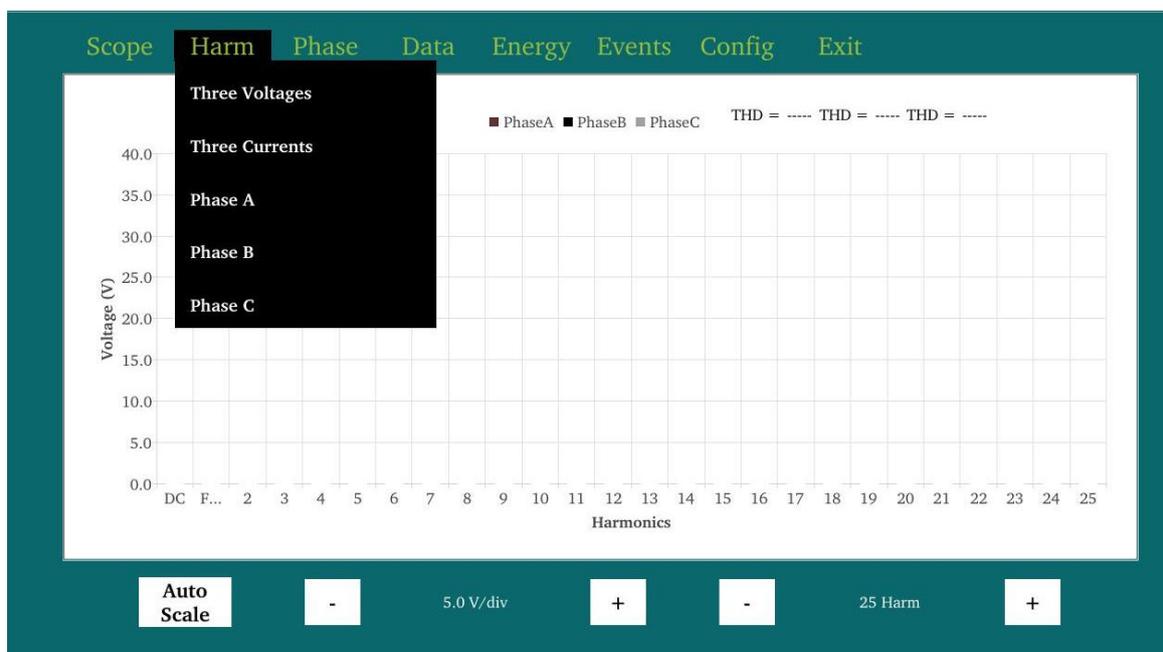


Figura 4.25 - Interface gráfica: menu *Harm* seleção dos valores pretendidos.

Ao menu *Harm* foi ainda adicionada a opção que permite mudar a escala. Desta forma, possibilita que a leitura da amplitude de cada uma das harmónicas seja feita com maior rigor possível. Neste âmbito, foi também possível implementar uma escala que permite visualizar as harmónicas de ordens mais próximas da frequência fundamental, para que se poder avaliar melhor as harmónicas que mais atormentam o sistema eléctrico.

Este menu renova todos os seus dados de 1280 em 1280 ms. Este valor, aparentemente elevado para uma amostragem de valores, deve-se ao facto da criação dos gráficos de barras possuir algoritmos complexos, refletindo-se este valor na taxa de renovação dos valores adjacentes a este.

O menu *Phase* foi criado para dar informação sobre os desfasamentos entre as três tensões e as três correntes. Neste é possível identificar dois tipos de maneiras diferentes para demonstrar os dados calculados. É possível encontrar um gráfico rotacional, onde são representados os fasores das tensões e das correntes, e é possível achar os dados numéricos relativos aos fasores, que representam o valor da amplitude na frequência fundamental e a fase de cada sinal também na frequência fundamental.

Na Figura 4.26 é possível identificar a interface gráfica produzida para o menu *Phase*, em que, do lado esquerdo da imagem, surge o gráfico rotacional para o desenho dos fasores e do lado direito surgem seis caixas onde consta a informação sobre a amplitude e a fase para as tensões e as correntes na frequência fundamental do sistema eléctrico.

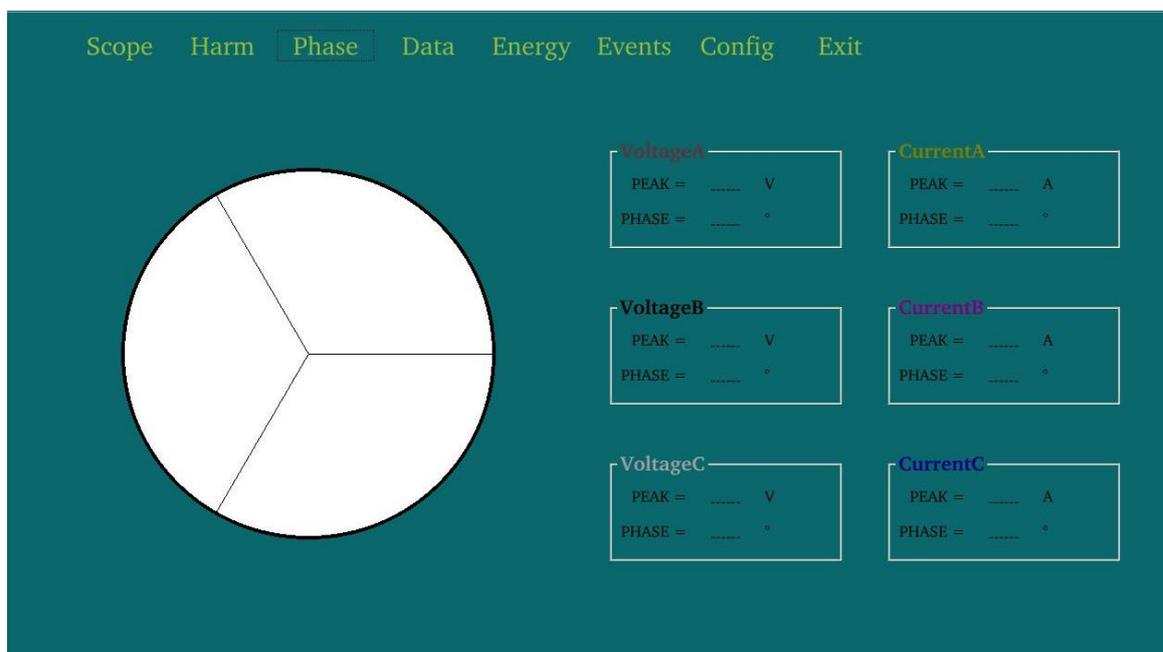


Figura 4.26 - Interface gráfica: menu *Phase*.

No menu *Phase* é efetuado o cálculo das fases do sistema na frequência fundamental dos sinais das tensões e das correntes. De forma a possibilitar este cálculo foi utilizada a fase na frequência fundamental da tensão na fase A como referência para calcular os desfasamentos entre cada uma das tensões e das correntes. O gráfico rotacional produzido para mostrar os desfasamentos de cada corrente e de cada tensão foi produzido com um sistema de ganhos diferentes para as tensões e para as correntes, de forma a melhorar a perceção do desfasamento entre cada fasor. Para a tensão foi definido como máximo o valor de pico nominal da tensão na rede, ou seja, é aproximadamente 325 V, e para as correntes foi definido um limite máximo dez vezes menor que o limite proposto para as tensões. É importante referir que este menu conta com uma taxa de amostragem igual à do menu anterior.

O menu *Data* foi implementado para disponibilizar todos os parâmetros calculados sobre os sinais adquiridos, nomeadamente o valor eficaz, o valor médio, o valor de pico, THD e a fase na frequência fundamental. Estes valores são calculados para as tensões e para as correntes de cada uma das fases. Por cada fase do sistema foi ainda implementado o cálculo das potências ativa, reativa e aparente e o cálculo do fator de potência total. Este possui uma taxa de amostragem de dados igual a do menu *Scope*, ou seja, renova os seus dados de 640 em 640 ms.

A Figura 4.27 mostra a interface gráfica produzida para o menu *Data*. Com a interpretação da figura é possível verificar uma separação por fases do sistema, em que para cada uma das fases este menu mostra todos os parâmetros calculados em relação às tensões e às correntes e finaliza com o cálculo das potências e o fator de potência total referente a cada uma das

fases em questão. Nesta figura é ainda possível verificar os parâmetros relacionados com a tensão entre o condutor de neutro e o condutor de terra e a corrente no neutro.

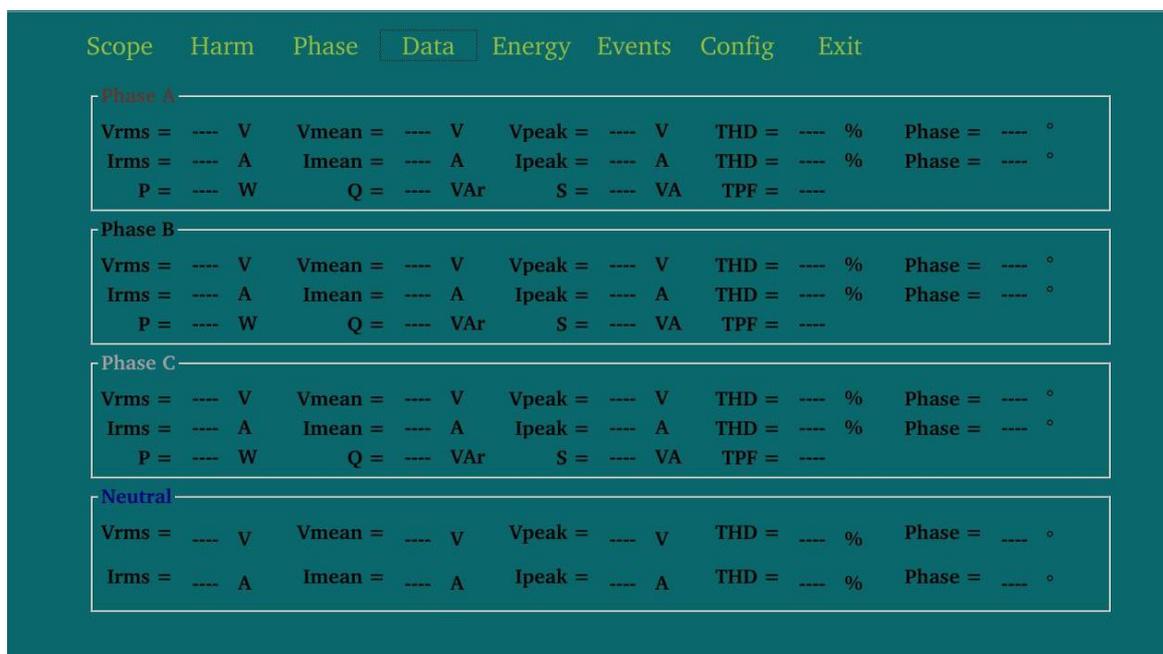


Figura 4.27 - Interface gráfica: menu *Data*.

O menu *Energy* foi construído para fornecer informação sobre a energia consumida pelas cargas a montante do local onde é instalado o sistema de monitorização de QEE. Neste é disponibilizado um esclarecimento sobre a potência ativa, reativa e aparente disponibilizada por cada uma das fases e as potências ativa, reativa e aparente totais fornecidas às cargas. Para o cálculo da potência aparente total foi seguido o modelo da equação 4.23.

$$S_t = \sqrt{P_t^2 + Q_t^2} \quad 4.23$$

Este menu conta ainda com uma janela que demonstra o valor da energia ativa fornecida às cargas de cada uma das fases e uma janela onde disponibiliza o valor da energia reativa consumida por as cargas também por cada uma das fases. O menu disponibiliza ainda os valores totais das energias ativa, reativa e aparente que estão a ser consumidas. Devido ao facto do cálculo da energia ser baseado na integração da potência no tempo, existem duas variáveis muito importantes a ter em conta no cálculo da energia, sendo uma delas as potências que já foram referenciadas anteriormente e outra o tempo de integração. Posto isto, é muito importante ter em conta o espaço de tempo que decorreu durante a verificação do valor da energia, para tal foi criado nesta interface um local onde é disponibilizada a hora de início do cálculo da energia e a hora de finalização deste mesmo cálculo.

Na Figura 4.28 é representada a interface gráfica produzida para mostrar o cálculo das energias, pode-se averiguar também com a visualização da mesma que na parte inferior aparece uma caixa que discrimina o valor das potências disponibilizadas à carga. No canto superior direito da figura visualizam-se duas escalas de tempo, em que a primeira é a hora em que começou a leitura das energias e a segunda é a hora em que é finalizado o processo de cálculo da energia. As duas primeiras caixas que surgem na imagem são referentes ao cálculo das energias ativa e reativa, respetivamente, por cada uma das fases do sistema elétrico. É importante saber que este cálculo é feito localmente no sistema de interface, por isso estas possuem um erro de aproximações superior ao cálculo da energia total que é feito com maior precisão no DSP.

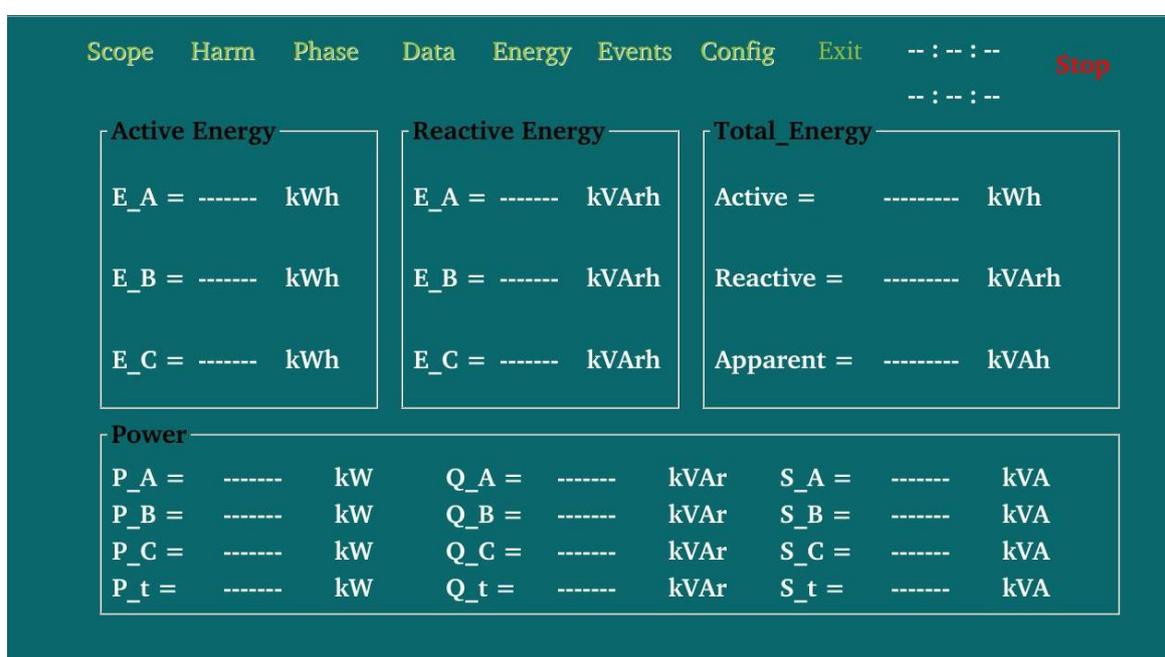
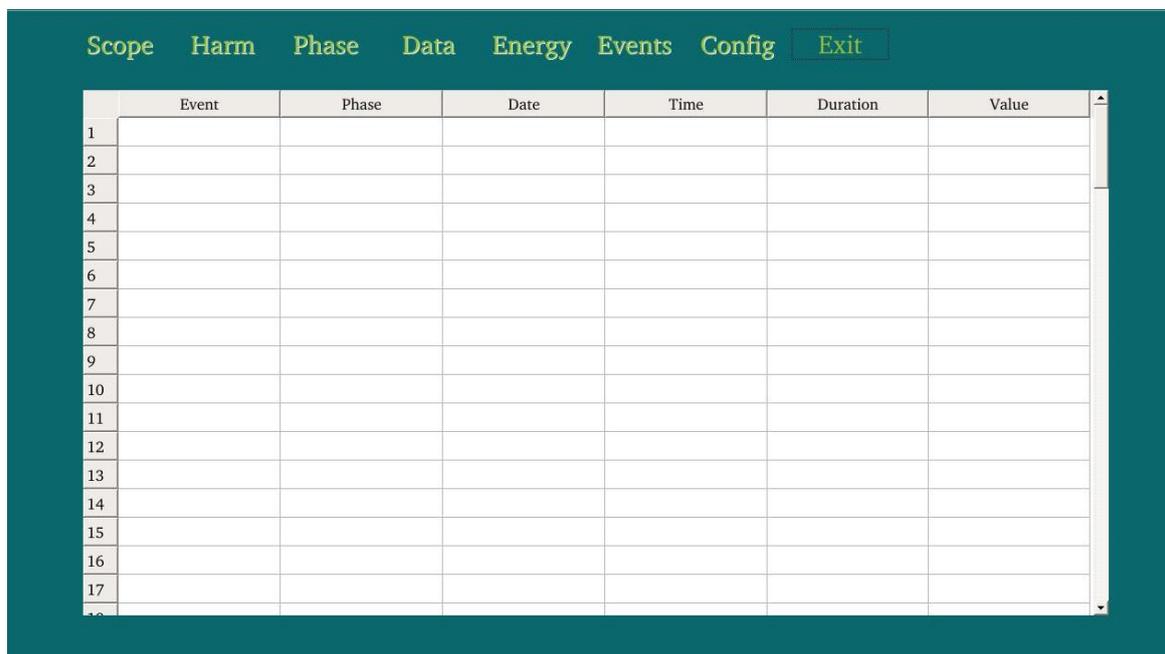


Figura 4.28 - Interface gráfica: menu *Energy*.

O menu *Events* foi pensado para fornecer alguns parâmetros relativos aos eventos de QEE que são detetados pelo processador ARM. Este dá a conhecer a fase em que ocorreu o evento, a data e a hora da ocorrência, o tempo que demorou até a tensão voltar ao seu valor nominal e o valor em que o valor eficaz da tensão mais de distanciou do seu valor nominal. É de grande importância referir que os eventos de QEE, neste sistema, são detetados cumprindo os requisitos da norma NP EN 50160.

Na Figura 4.29 é mostrada a interface produzida para o menu *Events*, na qual surge uma lista que é possibilitada a listagem de todos os eventos detetados por este sistema de monitorização. Nesta lista distingue-se uma barra superior onde consta algumas categorias, sendo elas a *Event*, *Phase*, *Date*, *Time*, *Duration* e a *Value*. A Categoria *Event* representa o tipo de evento que ocorreu, a *Phase* dá informação sobre em qual fase do sistema surgiu o

evento, a *Date* e a *Time* servem para datar o evento ocorrido, a *Duration* serve para fornecer informação sobre o tempo de propagação do evento e a categoria *Value* identifica o valor eficaz da tensão que mais se distanciou do valor nominal da mesma.



	Event	Phase	Date	Time	Duration	Value
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						

Figura 4.29 - Interface gráfica: menu *Events*.

4.3.4 Comunicação de Dados e Tramas Produzidas

Para realizar a troca de dados entre o processador ARM M3 presente na placa de desenvolvimento e a *Raspberry Pi 3* modelo B foi utilizada uma comunicação Ethernet. Neste projeto foi utilizada uma conexão ponto a ponto, o que significa que não houve o recurso a *routers*, *switches* ou qualquer outro intermediário para efetuar a conexão virtual entre os dois sistemas, ou seja, neste projeto foi realizada uma conexão física direta entre o sistema de interface e o processador ARM.

Para efetuar esta comunicação foi definido que o processador presente na placa de desenvolvimento seria o servidor e a *Raspberry Pi* seria o cliente. Para tal foi necessário recorrer à implementação de uma *socket* em que esta é complementada com um endereço IP (*Internet Protocol*) e uma porta. Ambos os parâmetros são fixos quer para o caso do servidor, quer para o caso do cliente.

Numa comunicação recorrendo a endereços IP convém existir uma definição clara de quem é o cliente e de quem é o servidor, embora estes possam inverter a situação se assim for pretendido. No entanto, neste projeto foi definido que o cliente seria o sistema de interface com o utilizador do sistema de monitorização. Desta forma o cliente envia pedidos de

informação para o servidor e aguarda os dados que foram requisitados. No caso dos dados pedidos não chegarem ao cliente com sucesso, este refaz o pedido dos dados para que não comprometa a informação que irá transmitir a posteriori.

Para formular a comunicação entre o cliente e o servidor foi criada uma trama de comando, possuindo apenas dois bytes, em que o primeiro byte representa o pedido de informação realizado e o segundo byte serve para fornecer informação ao servidor sobre o final da trama de comando. Esta trama de comando é enviada do cliente para o servidor. Na Tabela 4.6 estão presentes os comandos enviados para o servidor e uma pequena descrição do que estes comandos estão a requerer.

O processador ARM M3, presente na placa de desenvolvimento, foi definido como sendo o servidor das comunicações com o sistema de interface com o utilizador. Deste modo este necessita de estar permanentemente ativo de forma a responder positivamente a todos os pedidos de dados provenientes da *Raspberry Pi 3* modelo B.

O servidor responde a todos os pedidos sempre com a mesma estrutura de trama, sendo esta definida por um byte, que possui o identificador do tipo de resposta que envia ao cliente, seguido por um conjunto de bytes de dados. O primeiro byte é igual ao primeiro byte enviado pelo cliente ao fazer o pedido de informação, este foi implementado de forma a informar o cliente sobre o tipo de trama que está a receber. Quanto ao conjunto de bytes de dados estes podem possuir diversos tamanhos, dependendo unicamente da informação que o servidor está a enviar.

A trama enviada pelo servidor que responde ao pedido das três tensões segue o formato da Figura 4.30. A trama que é enviada pelo servidor em resposta ao pedido das três correntes é semelhante à trama das tensões, trocando apenas os sinais das tensões pelos sinais das correntes, sendo que para cada sinal enviado são necessários 256 bytes para o definir e ainda são acoplados mais 10 bytes de dados com informação sobre o valor eficaz, o valor médio, o valor de pico, o THD e a fase na frequência fundamental do sinal.

ID dos Dados 1 B	Tensão A 256 B 10 B de Dados	Tensão B 256 B 10 B de Dados	Tensão C 256 B 10 B de Dados
---------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------

Figura 4.30 - Trama de dados: três tensões.

Tabela 4.6 - Comandos enviados pelo sistema de interface para o servidor.

Trama	Designação
0	Teste de conexão
1	Pedido das três tensões e respetivos parâmetros calculados
2	Pedido das quatro tensões e respetivos parâmetros calculados
3	Pedido das três correntes e respetivos parâmetros calculados
4	Pedido das quatro correntes e respetivos parâmetros calculados
5	Pedido da tensão e corrente na fase A e respetivos parâmetros calculados
6	Pedido da tensão e corrente na fase B e respetivos parâmetros calculados
7	Pedido da tensão e corrente na fase C e respetivos parâmetros calculados
8	Pedido das amplitudes das harmónicas nas tensões e THD das tensões
9	Pedido das amplitudes das harmónicas nas correntes e THD das correntes
10	Pedido das amplitudes das harmónicas na tensão e na corrente da fase A e respetivo THD
11	Pedido das amplitudes das harmónicas na tensão e na corrente da fase B e respetivo THD
12	Pedido das amplitudes das harmónicas na tensão e na corrente da fase C e respetivo THD
13	Pedido das fases e das amplitudes de cada sinal na frequência fundamental
14	Pedido de todos os parâmetros calculados relativos aos sinais
15	Pedido do valor da energia consumida e das potências em cada uma das fases
16	Pedido da hora atual
17	Cessar pedido do valor da energia e das potências
18	Pedido de todos os eventos de QEE
19	Confirmação do final de todos os eventos recebidos

A trama que envia a informação sobre as tensões nas fases e a tensão entre o neutro e a terra é em tudo semelhante à trama anterior, apenas acrescentando mais 266 bytes sobre a informação da tensão no neutro, o mesmo se aplica à trama responsável por enviar a informação sobre a corrente nas fases e a corrente no neutro.

Quanto à trama responsável por enviar os sinais de cada fase, sinal da tensão e da corrente, é seguido o modelo apresentado na Figura 4.31. A interface produzida para este pedido

apresenta as formas de onda da tensão e da corrente, os parâmetros que caracterizam estes sinais e ainda disponibiliza os valores das potências fornecidas às cargas pela fase em questão.

ID dos Dados 1 B	Tensão 256 B 10 B de Dados	Corrente 256 B 10 B de Dados	Potência 12 B
---------------------	----------------------------------	------------------------------------	------------------

Figura 4.31 - Trama de dados: tensão e corrente por fase.

A Figura 4.32 representa a trama enviada em resposta ao pedido das tensões harmónicas. Nesta trama é possível identificar as harmónicas para cada uma das fases do sistema, a fase na fundamental (F_f) e ainda é possível identificar o THD da tensão de cada uma das fases. A trama produzida para enviar a informação sobre as harmónicas de corrente é em tudo semelhante à trama produzida para o envio das tensões harmónicas, alterando apenas as variáveis, que desta forma passam a ser todas sobre as correntes.

ID dos Dados 1 B	Harm_VA 64 B 2 B F_f	Harm_VB 64 B 2 B F_f	Harm_VC 64 B 2 B F_f	THD_Tensões 6 B
---------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------	--------------------

Figura 4.32 - Trama de dados: harmónicas nas três tensões.

Na interface produzida para demonstrar as harmónicas é possível visualizar as harmónicas constituintes dos sinais por cada uma das fases, ou seja, é possível identificar as harmónicas da tensão e da corrente em cada uma das fases. A trama criada para este efeito é muito semelhante à trama anterior, necessitando de pequenas alterações, como é possível visualizar na Figura 4.33.

ID dos Dados 1 B	Harm_V 64 B 2 B F_f	Harm_I 64 B 2 B F_f	THD_ 4 B
---------------------	-----------------------------	-----------------------------	-------------

Figura 4.33 - Trama de dados: harmónicas por fase.

À trama de comando responsável por pedir os valores dos desfasamentos dos sinais adquiridos, é formulada uma resposta que segue o formato de trama imposto pela Figura 4.34. Nesta figura verifica-se o envio da informação sobre todos os desfasamentos, tanto para as correntes como para as tensões, assim como o valor de pico na frequência fundamental das tensões e das correntes, estas duas componentes do sinal são suficientes para que o sistema de interface possa desenhar todos os fasores do sistema.

ID dos Dados 1 B	Fases na Fundamental 12 B	Valor de Pico 12 B
---------------------	------------------------------	-----------------------

Figura 4.34 - Trama de dados: desfasamento entre as fases.

De forma a poder responder positivamente ao comando responsável por pedir todos os parâmetros calculados relativos aos sinais lidos, o servidor cria uma mensagem onde consta toda a informação sobre estes parâmetros. Nesta trama consta a informação sobre o valor eficaz, o valor médio, o valor de pico, o THD e a fase, isto para as tensões e para as correntes, e necessita ainda de enviar informação sobre as potências ativa, reativa e aparente calculadas por cada uma das fases da rede elétrica, como foi visto na descrição do menu *Data*. Na Figura 4.35 é possível visualizar o formato da trama de dados enviada.

ID dos Dados 1 B	Potências 36 B	Dados 48 B	Fase na Fundamental 12 B
---------------------	-------------------	---------------	-----------------------------

Figura 4.35 - Trama de dados: todos os parâmetros calculados dos sinais.

No momento em que o sistema de interface formula o pedido sobre as energias consumidas pelas cargas a montante da instalação elétrica, onde está montado o sistema de monitorização, o servidor formula uma mensagem que fornece a informação sobre o total das energias ativa, reativa e aparente que está a ser consumida pelas cargas. Na trama de dados formulada para este pedido consta ainda a informação sobre as potências disponibilizadas às cargas por cada uma das fases do sistema. Na Figura 4.36 é possível visualizar a estrutura da trama produzida para dar resposta ao pedido do valor da energia consumida.

ID dos Dados 1 B	Potências 36 B	Valores Totais da Energia 24 B
---------------------	-------------------	-----------------------------------

Figura 4.36 - Trama de dados: valores das potências e da energia.

A hora é um dado muito importante a ser enviado do servidor para o cliente, pois esta irá permitir visualizar o período de tempo que decorre no cálculo das energias. Posto isto, foi criada uma trama de dados que permite enviar a hora em que se inicia o cálculo da energia e a hora em que este cálculo é finalizado. Para esta trama foi seguida a estrutura da Figura 4.37, em que é definido 1 byte para cada um dos parâmetros a enviar.

ID dos Dados 1 B	Ano 1 B	Mês 1 B	Dia 1 B	Hora 1 B	Minutos 1 B	Segundos 1 B
---------------------	------------	------------	------------	-------------	----------------	-----------------

Figura 4.37 - Trama de dados: data e hora.

O comando que é responsável por pedir todos os eventos de QEE detetados pelo servidor obriga o servidor a fazer uma leitura de valores gravados no cartão de memória inserido na placa de desenvolvimento e a gerar uma mensagem a partir desses valores. O tamanho da trama a enviar é variável, pois este vai depender do número de eventos gravados num ficheiro; no entanto, por ficheiro é possível ter no mínimo um evento de QEE e no máximo três eventos, logo o tamanho da trama é variável, mas dentro de limites conhecidos. No fim da trama de dados gerada para enviar a informação sobre os eventos de QEE registados é enviado um byte que é responsável por identificar se todos os eventos já foram enviados ou se ainda existe novos eventos para enviar. Na Figura 4.38 é possível constatar o formato da trama enviada pelo servidor em resposta a este comando. O formato dos dados relativos à data segue o formato da trama anterior, retirando apenas o byte que define o tipo de dados enviados.

ID dos Dados 1 B	ID do Evento 1 B	Fase 1 B	Valor 1 B	Duração 1 B	Data e Hora 6 B	Último Evento 1 B
---------------------	---------------------	-------------	--------------	----------------	--------------------	----------------------

Figura 4.38 - Trama de dados: eventos detetados.

Por fim, os comandos identificados na Tabela 4.6 com os números 17 e 19 são enviados para o servidor para cancelar os pedidos que estão a eles associados, por isso a resposta do servidor serve simplesmente para confirmar que o pedido de cancelamento foi recebido com êxito. A trama é simplesmente constituída por um byte que é o igual ao que este recebeu.

4.4 Conclusão

Ao longo deste capítulo foi descrito todo o hardware e todo o software envolvido no projeto do sistema de monitorização realizado.

A nível de hardware foi descrito todo o material utilizado na construção do sistema de monitorização, começando por uma breve apresentação dos sensores de tensão e de corrente escolhidos, um estudo sobre os filtros passa-baixo analógicos de forma a minimizar o efeito do *aliasing* na aquisição de sinal, o dimensionamento da placa de condicionamento de sinal e

a integração de um ADC externo que possibilitasse a leitura de sinais provenientes de oito canais diferentes. Passando para o estudo da placa de desenvolvimento obtida, realçam-se as características mais importantes na realização deste projeto, como é exemplo, a porta Ethernet e a *socket* μ SD, para a inclusão de um cartão de memória. Foi ainda introduzida a *Raspberry Pi 3* modelo B, cuja principal função neste projeto é produzir a interface gráfica que é responsável por mostrar os dados relativos às leituras dos sensores.

Para a realização deste projeto foi necessário produzir software para três plataformas diferentes, sendo estas um processador ARM M3, um DSP C28 e para a *Raspberry Pi*. Para o processador ARM foi realizado um software de aquisição de sinal, de forma a adquirir os sinais provenientes do ADC externo e um conjunto de módulos de comunicação para que desta forma fosse possível comunicar com o RTC, com o DSP e com o sistema de interface. O DSP C28 ficou responsável por todos os cálculos adjacentes aos sinais lidos, como é exemplo o valor eficaz do sinal e a RFFT do mesmo. Para desenvolver o software para estas duas plataformas foi utilizado o CCS. Quanto ao sistema de interface produzido para este projeto foi utilizado o *Qt-Linux*. Este possibilita a utilização do método *cross-compile* que desta forma faculta a compilação de um programa num sistema operativo diferente do que aquele onde será executado o mesmo programa, deste que este seja um sistema operativo baseado no *Linux*. Todo o software criado para a aplicação gráfica foi desenvolvido com o intuito de ser o mais simples possível para que o futuro utilizador consiga se adaptar facilmente a este. Na construção desta interface não foram comprometidos os dados mais importantes na avaliação da qualidade da energia.

Capítulo 5

Testes ao Sistema de Monitorização Desenvolvido

5.1 Introdução

Ao longo deste capítulo são validadas as funcionalidades do sistema de monitorização desenvolvido. Para tal foram realizados em laboratório dois testes distintos, em que no primeiro foi utilizada uma carga linear e no segundo foi colocada em paralelo à carga da fase A uma carga não-linear. É importante referir que, por precaução, este sistema não foi acoplado diretamente a rede, os valores adquiridos por este foram obtidos à saída de um variac. Para que o variac operasse longe do seu ponto de máxima potência não foi utilizado o valor eficaz nominal da tensão, ou seja, o valor foi fixado a 100 V. Esta imposição de valor da tensão também facilitou a tarefa de deteção de eventos de QEE, porque para testar uma sobretensão não é necessário ultrapassar o valor nominal da tensão na rede, desta forma não sujeitando as cargas a níveis de tensão muito elevados.

5.2 Teste Efetuado com Carga Linear

Nesta primeira fase são apresentados alguns resultados experimentais recorrendo a uma carga linear construída pelos investigadores do laboratório do GEPE. Esta carga é puramente resistiva, o que faz com que o fator de potência seja unitário. A montagem utilizada para este teste pode ser revista na Figura 5.1. Como já foi referido na introdução deste capítulo e como se pode verificar nesta figura, a leitura dos valores das tensões e das correntes não foi feita diretamente da rede elétrica, mas sim à saída de um variac. De forma a diminuir o efeito das perdas nas indutâncias deste transformador variável foi definido o valor da tensão eficaz como sendo 100 V. Posto isto, a forma de onda da tensão que se encontra à saída do variac é muito semelhante à forma de onda da tensão que se encontra no primário do mesmo, para que desta forma o valor lido pelo sistema de monitorização se aproxime o mais possível do valor real da tensão que se encontra na rede elétrica.

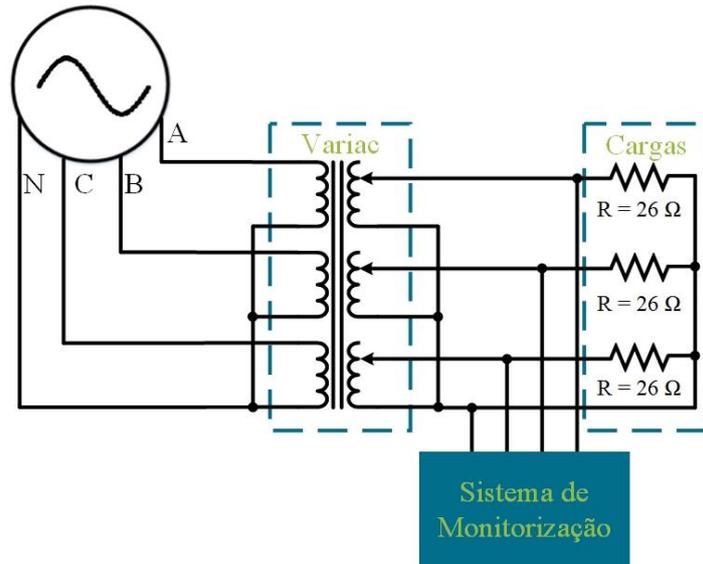


Figura 5.1 - Esquema de Montagem do primeiro teste efetuado – Carga Linear.

Conhecida a carga e as condições de medição deste sistema de monitorização, são agora apresentados os resultados obtidos pelo sistema implementado. O menu *Scope* possui vários modos de operação. Na Figura 5.2 é apresentado o resultado da leitura das tensões nas três fases, em que se verifica que as tensões se encontram com um *THD* dentro dos valores definidos pela norma NP EN 50160 (o *THD* das tensões não deve ultrapassar 8%) [5], as tensões possuem praticamente o mesmo valor eficaz e um desfasamento entre cada uma de 120°. É importante referir que foi feito um ajuste da escala para que fosse possível visualizar a forma de onda das tensões.

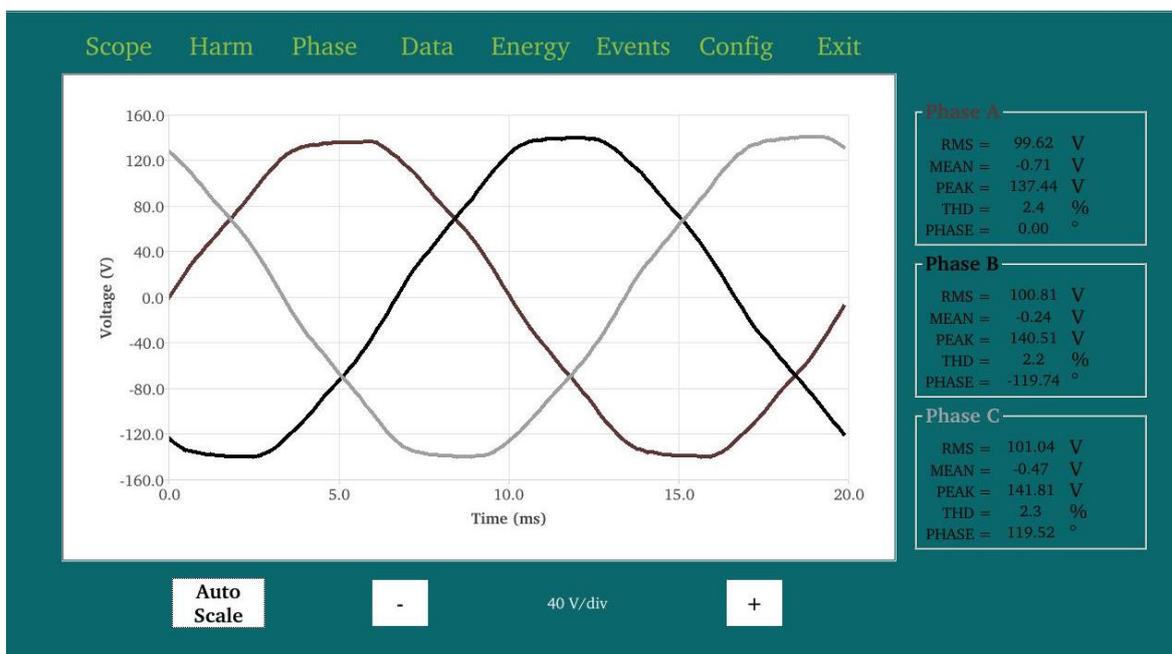
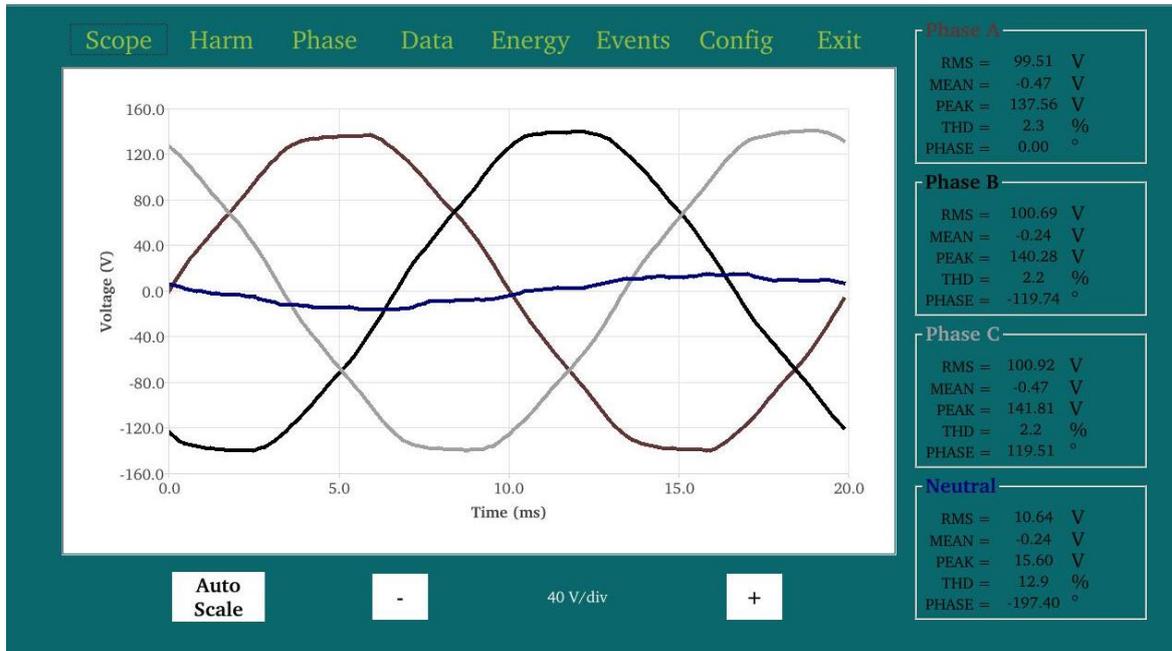


Figura 5.2 - Carga Linear: menu *Scope* mostrado as tensões nas fases.

À leitura das formas de onda das tensões pode ser adicionada ainda uma quarta tensão, sendo esta a que se verifica entre o condutor de neutro e o condutor de terra. Esta tensão em condições ideais seria praticamente nula, mas visto que por vezes os condutores de neutro estão sujeitos a correntes muito elevadas e que o metal que o constitui não é ideal, ou seja, possui perdas nas indutâncias parasitas e na resistência do material constituinte do condutor, é criada uma tensão entre o condutor de neutro e a terra. Na zFigura 5.3 verifica-se que a tensão entre os condutores de neutro e terra assume um valor já considerável, sendo para este caso específico cerca de um décimo da tensão nominal.



zFigura 5.3 - Carga Linear: menu *Scope* mostrando as tensões nas fases e a tensão neutro-terra.

No menu *Scope* encontra-se também uma opção que demonstra as formas de onda das correntes que percorrem os condutores nas três fases do sistema elétrico. Na Figura 5.4 é possível visualizar a forma de onda provocada pelas correntes consumidas pelas cargas. A carga utilizada neste teste é a que surge na Figura 5.1, que é puramente resistiva o que faz com que as correntes estejam em fase com as tensões e com a mesma forma de onda das tensões que foram visualizadas na Figura 5.2. Na Figura 5.4 foram ajustados os valores das escalas para que fosse possível visualizar as formas de onda das correntes ao longo do tempo.

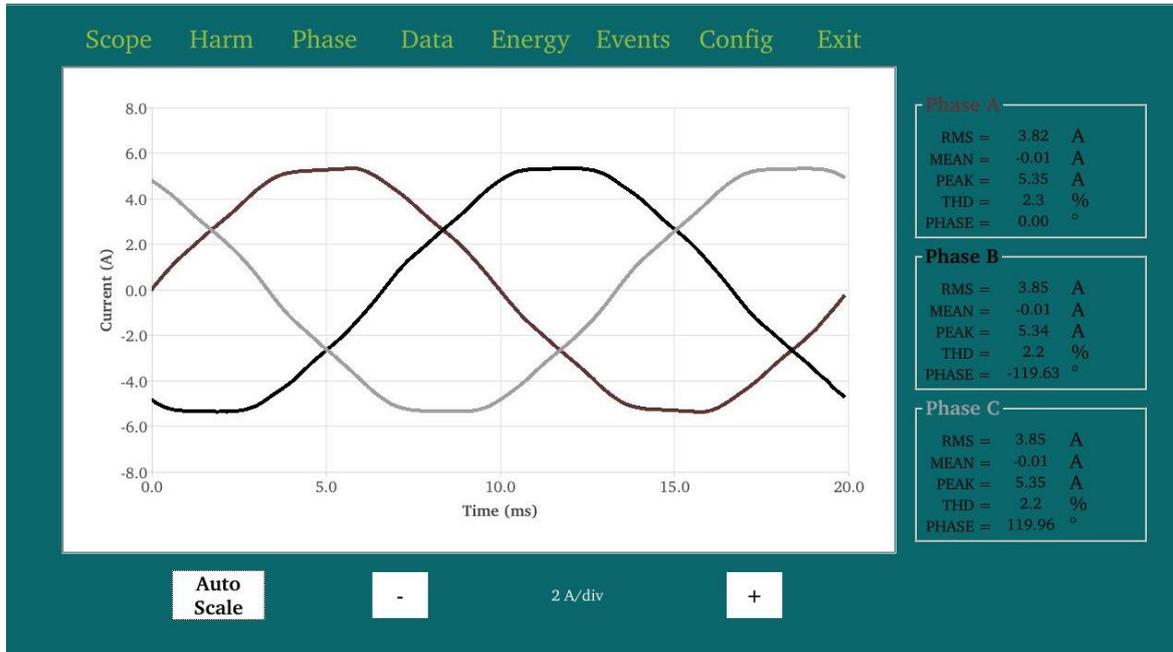


Figura 5.4 - Carga Linear: menu *Scope* mostrando as correntes das fases.

Como foi referido no capítulo anterior, Implementação do Sistema de Monitorização, a corrente de neutro não é adquirida através de um canal de ADC, mas é calculada para que seja possível visualizar a forma de onda da mesma. Na Figura 5.5 é possível visualizar a forma de onda das correntes nas fases e a corrente no neutro para a carga em questão. Visto que o conteúdo harmónico das tensões é baixo, que a carga está uniformemente distribuída pelas fases e que as tensões estão balanceadas entre si, a corrente de neutro desta instalação é residual.

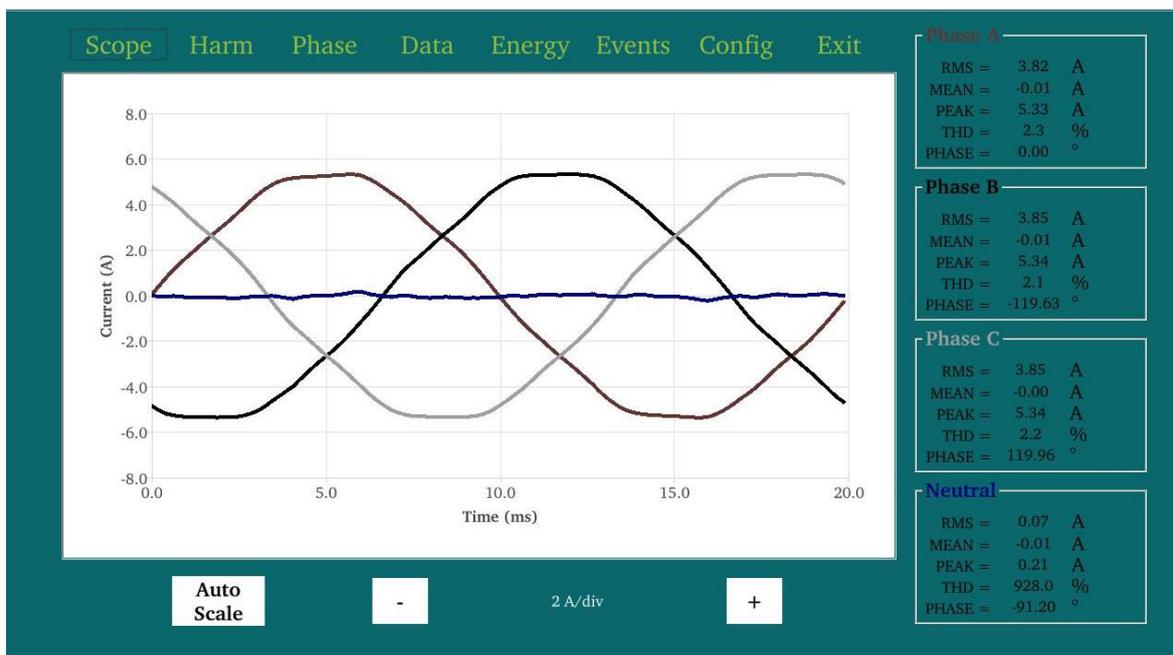


Figura 5.5 - Carga Linear: menu *Scope* mostrando a corrente nas fases e no neutro.

No menu *Scope* é ainda possível avaliar a forma de onda da tensão e da corrente por fase. Nesta opção é possível averiguar os desfasamentos entre a tensão e a corrente e verificar as potências disponibilizadas por cada uma das fases à carga. Na Figura 5.6 é possível confirmar esta informação para a fase A. Os Resultados que foram obtidos para as outras duas fases são semelhantes, visto que a carga está uniformemente distribuída pelas três fases, pelo que as ondas da corrente e da tensão são muito parecidas independentemente das fases.

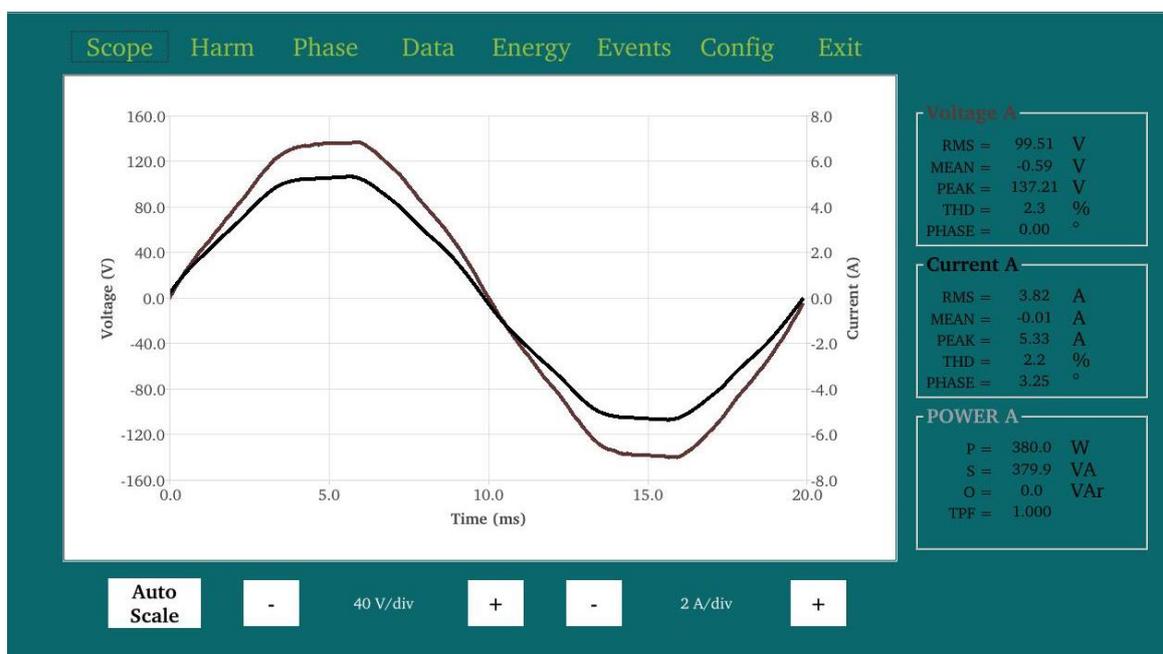


Figura 5.6 - Carga Linear: menu *Scope* mostrando as formas de onda da tensão e da corrente na fase A.

Para a carga representada na Figura 5.1 foi ainda possível fazer uma avaliação das frequências harmónicas que constituem os sinais lidos. No menu *Harm* é possível visualizar um gráfico de barras onde é apresentada amplitude de cada uma das frequências harmónicas, neste menu tal como no menu *Scope* é possível visualizar as harmónicas das tensões e das correntes nas fases do sistema eléctrico em questão e também avaliar as harmónicas da corrente e da tensão por cada uma das fases individualmente.

Na Figura 5.7 encontra-se o resultado obtido no teste das harmónicas das tensões recolhidas nas três fases do sistema eléctrico onde está incluído o sistema de monitorização desenvolvido. Nesta figura pode ser revista a amplitude de cada uma das harmónicas constituintes do sinal lido até à harmónica 25^a, embora o cálculo das harmónicas seja efetuado até à 255^a harmónica e o cálculo do *THD* seja feito até à 32^a harmónica.

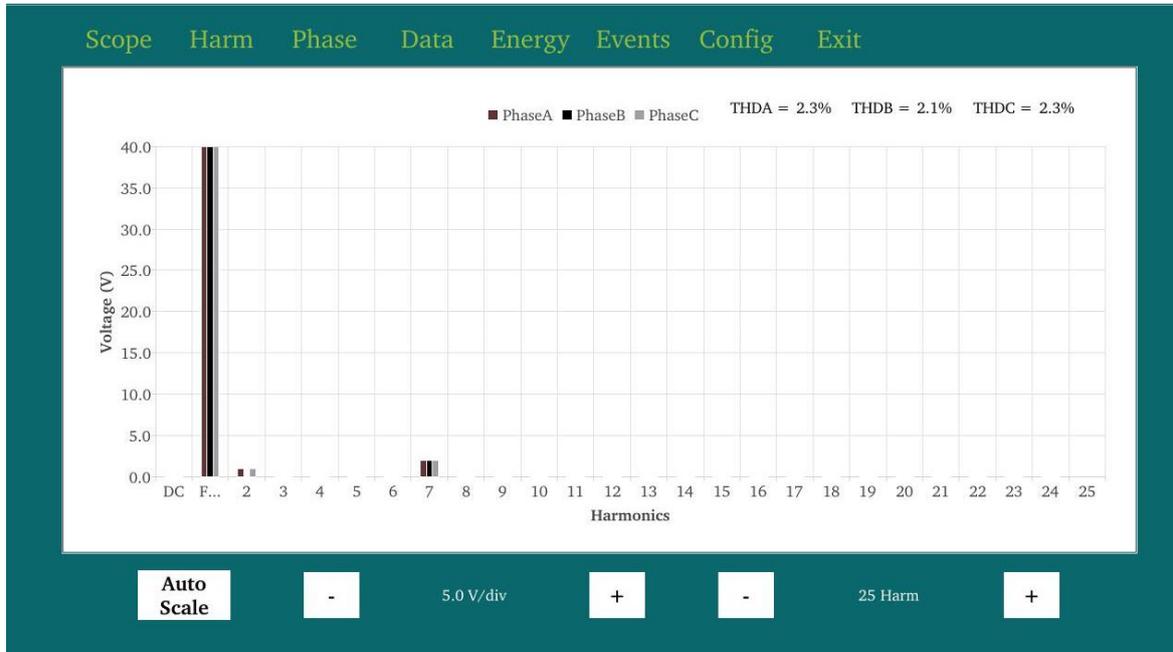


Figura 5.7 - Carga Linear: menu *Harm* mostrando as amplitudes das harmónicas das três tensões.

No menu *Harm* foi ainda possível realizar a avaliação das harmónicas e do THD das correntes que são fornecidas às cargas deste sistema, na Figura 5.8 encontra-se esse mesmo exemplo. Comparando esta figura com a Figura 5.7 verifica-se que o THD se mantém praticamente igual em todas as fases deste sistema, isto deve-se ao facto da carga ser uma carga linear, não introduzindo por isso harmónicas no sinal da corrente.

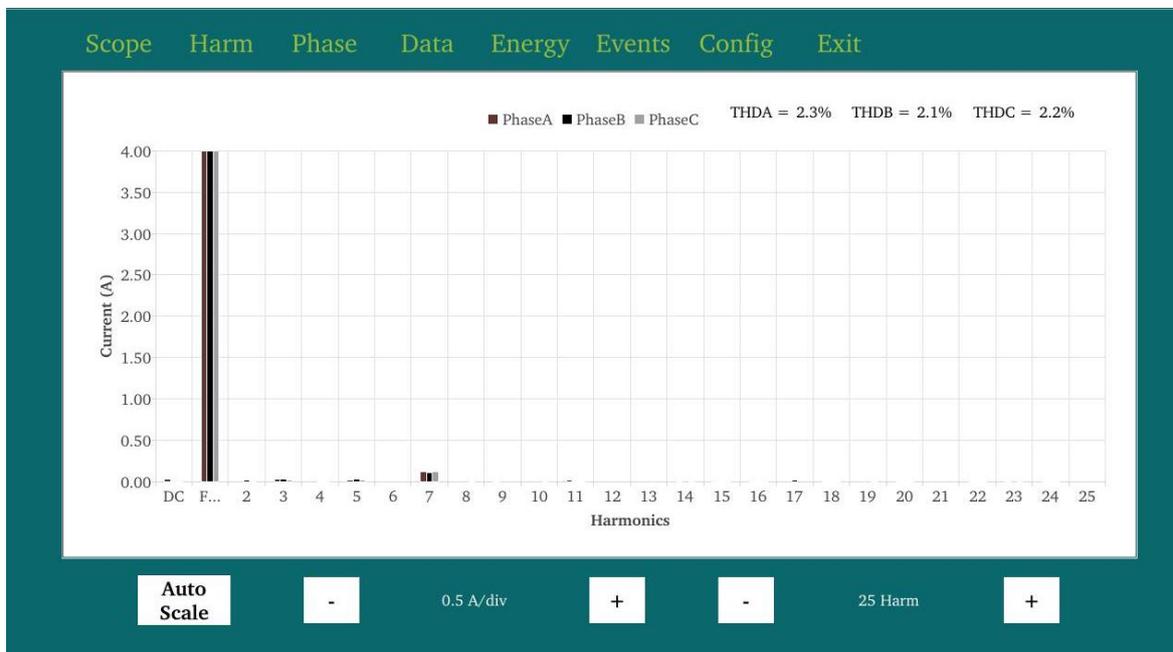


Figura 5.8 - Carga Linear: menu *Harm* mostrando as amplitudes das harmónicas das três correntes.

No menu *Harm* foi ainda realizado o teste das harmónicas por cada uma das fases, em que são testadas as harmónicas da tensão e da corrente para cada uma das fases do sistema elétrico

trifásico em separado. Na Figura 5.9 é possível visualizar o resultado do teste realizado para a fase A do sistema. É importante referir que a carga se mantém a mesma para todo o teste realizado. Devido às semelhanças dos resultados obtidos entre cada uma das fases, na figura só é apresentada a fase A, porque os testes são muito semelhantes para as outras duas fases.

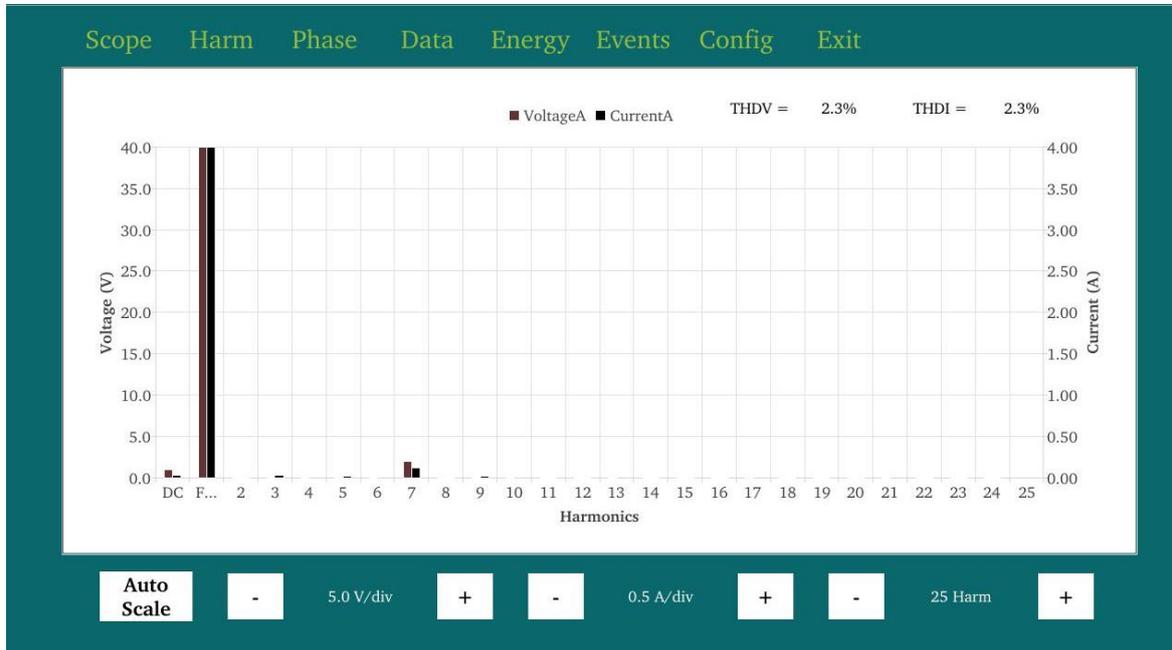


Figura 5.9 - Carga Linear: menu *Harm* mostrando as amplitudes harmónicas da corrente e da tensão na fase A.

Para a carga linear selecionada foi ainda testado o comportamento dos desfasamentos entre as três tensões e correntes. Na Figura 5.10 é possível rever o resultado obtido neste teste. O desfasamento da tensão da fase A foi utilizado como referência por isso é que este surge sempre com o valor 0. Neste resultado pode-se averiguar que o desfasamento das tensões de cada uma das fases é muito semelhante ao desfasamento das correntes nessa mesma fase, isto acontece porque a carga selecionada é uma carga resistiva.

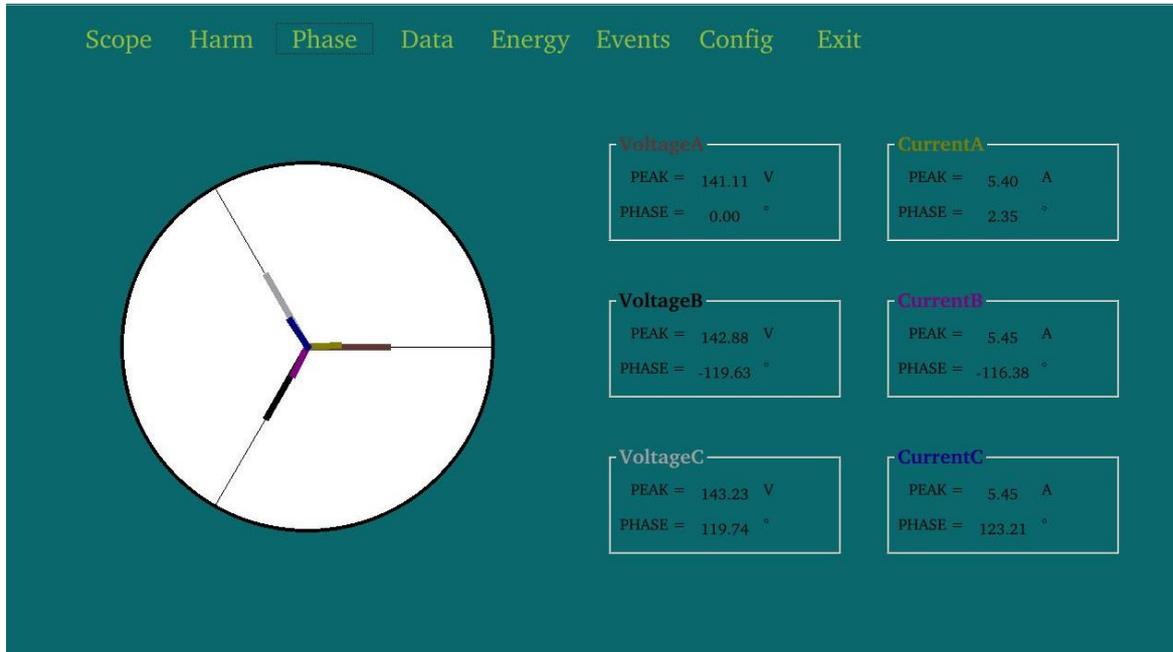


Figura 5.10 - Carga Linear: menu *Phase*.

No menu *Data* (Figura 5.11) é possível visualizar os valores de todos os parâmetros calculados das tensões, das correntes e das potências. Estes valores apresentam-se separados por fase, sendo que para cada uma das fases é possível identificar na primeira linha todos os parâmetros calculados da tensão, na segunda os parâmetros relativos à corrente e na terceira e última linha é possível identificar a potência disponibilizada e o fator de potência total de cada uma das fases.

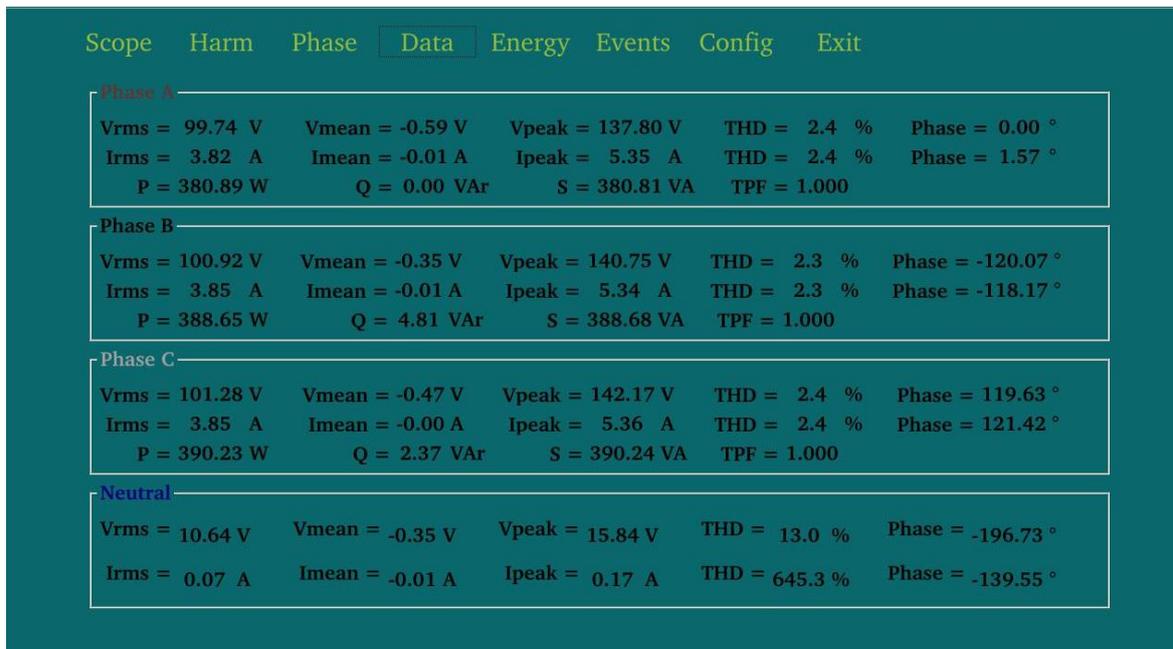


Figura 5.11 - Carga Linear: menu *Data*.

Para a carga apresentada na Figura 5.1 foi ainda realizado um teste à energia consumida pelas cargas deste sistema. Na Figura 5.12 é possível identificar o teste realizado ao consumo energético provocado por esta carga. Este durou um minuto e sete segundos e consumiu vinte e um watts hora de energia elétrica. Devido ao facto da carga ser puramente resistiva o consumo de energia reativa é praticamente nulo e o valor total da energia consumida é unicamente o valor da energia ativa. Neste menu é possível avaliar também o consumo energético provocado por cada uma das fases do sistema elétrico e ainda o valor das potências disponibilizadas às cargas deste sistema.

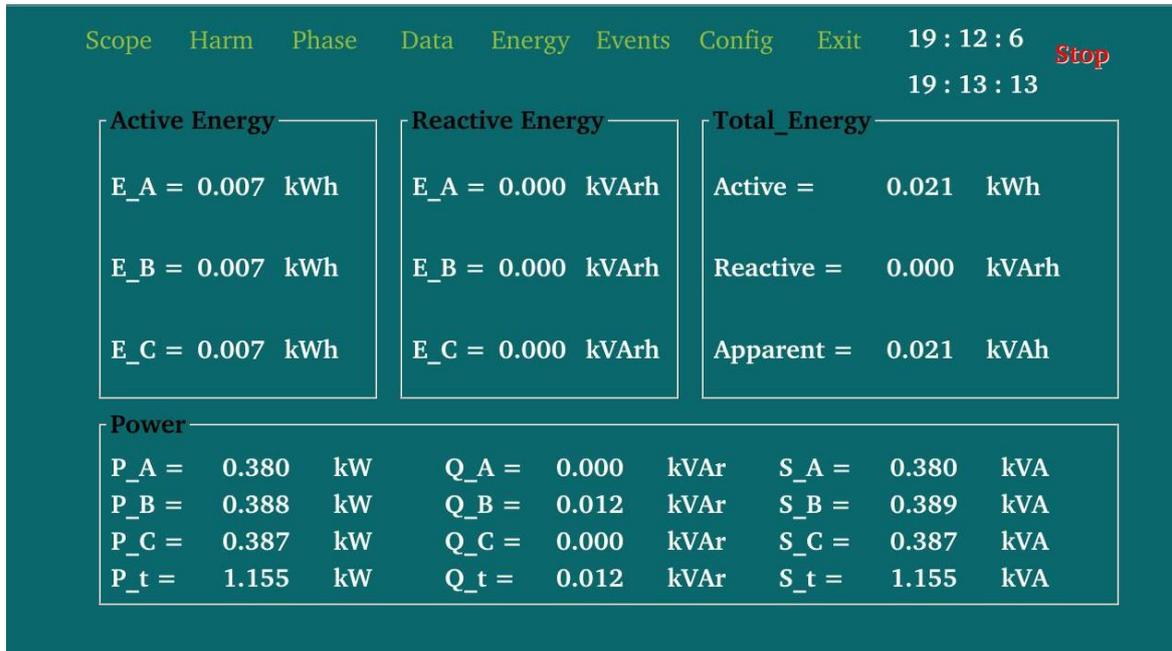


Figura 5.12 - Carga Linear: menu *Energy*.

De forma a testar o menu *Events* foram provocados, com a ajuda do variac, alguns eventos de QEE. Foram simuladas uma sobretensão momentânea, uma subtensão momentânea e uma interrupção. Na Figura 5.13 encontra-se o resultado obtido para este teste. Desta forma foi possível validar o funcionamento da deteção e eventos de QEE. Para provocar este efeito o variac foi colocado numa tensão muito próxima de 90 V, e como a tensão na fase B nesse instante continha um valor eficaz muito perto do limite de deteção do evento, qualquer variação deste valor levaria à deteção de uma subtensão. É importante referir, uma vez mais, que o valor nominal da tensão foi definido como sendo 100 V.

Event	Phase	Date	Time	Duration	Value
1 Sag	A	30/3/2017	19:26:38	22.310 s	3.42718 V
2 Sag	B	30/3/2017	19:26:38	20.250 s	5.08168 V
3 Sag	C	30/3/2017	19:26:38	20.210 s	4.9635 V
4 Interrupt	A	30/3/2017	19:22:6	273.220 s	0.472714 V
5 Interrupt	B	30/3/2017	19:22:6	273.230 s	0.354535 V
6 Interrupt	C	30/3/2017	19:22:6	273.210 s	0.472714 V
7 Sag	A	30/3/2017	19:21:16	19.680 s	2.95446 V
8 Sag	C	30/3/2017	19:21:35	0.010 s	89.9338 V
9 Sag	B	30/3/2017	19:21:16	19.210 s	2.71811 V
10 Sag	C	30/3/2017	19:21:16	19.210 s	1.6545 V
11 Interrupt	A	30/3/2017	19:18:29	167.540 s	0.590892 V
12 Interrupt	B	30/3/2017	19:18:29	167.530 s	0.354535 V
13 Interrupt	C	30/3/2017	19:18:29	167.520 s	0.590892 V
14 Interrupt	A	30/3/2017	19:14:11	3.860 s	0.354535 V
15 Interrupt	C	30/3/2017	19:14:11	3.860 s	0.472714 V
16 Interrupt	B	30/3/2017	19:14:11	3.870 s	0.354535 V
17 Swell	C	30/3/2017	19:13:51	7.930 s	147.369 V

Figura 5.13 - Carga Linear: menu *Events*.

5.3 Teste Efetuado com Carga Não-Linear

Como foi referido na introdução do presente capítulo, de forma a testar as capacidades do sistema de monitorização implementado foi acoplada na fase A uma carga não-linear. Com a inserção desta carga na fase A e mantendo a carga anterior foi possível desequilibrar as cargas por fase. Desta vez entre a carga e a fase encontra-se um retificador de onda completa com um condensador em paralelo, como se pode averiguar na Figura 5.14.

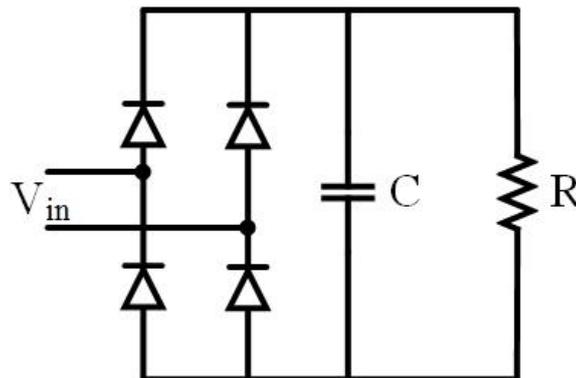


Figura 5.14 - Carga não-linear acrescentada à fase A.

Para esta carga não foram realizados testes aos menus *Energy* e *Events*, visto que os resultados do teste anterior já esclarecem as capacidades destes menus. Posto isto, no menu *Scope* foi possível testar a forma de onda das tensões, e foi encontrado um problema associado à utilização de um variac para poder controlar a tensão que era lida pelo sistema de monitorização desenvolvido. Este problema pode ser observado na Figura 5.15,

verificando-se que tensão na fase A assume uma forma de onda diferente das outras duas tensões, devido ao facto de se ter aumentado a potência disponibilizada por esta fase e por nesta se ter aumentado também o consumo de harmónicas. Estes dois fatores são responsáveis por aumentar significativamente o valor das perdas na indutância do variac, afetando deste modo a forma de onda da tensão lida.

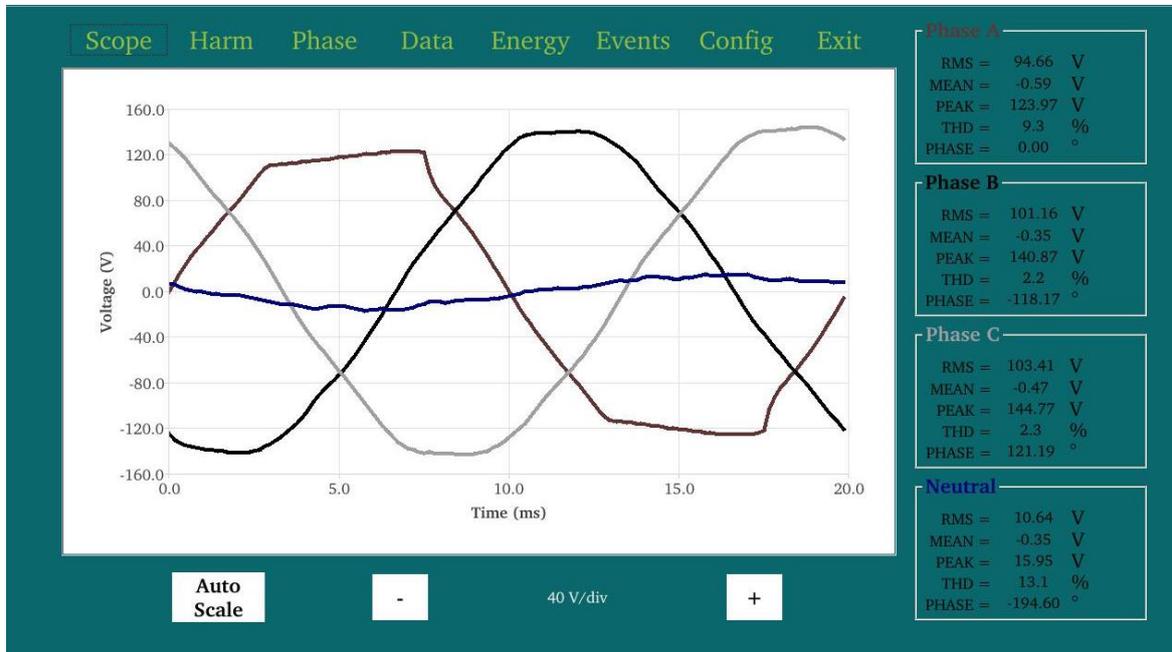


Figura 5.15 - Carga Não-Linear: menu *Scope* mostrando as tensões.

No menu *Scope* foi também realizado um teste às quatro correntes do sistema, as correntes nas fases e a corrente de neutro (Figura 5.16). Neste teste é possível visualizar que as correntes nas fase B e C continuam iguais ao teste anterior, sendo possível visualizar também a forma de onda da corrente na fase A e a corrente no neutro. A corrente de neutro, devido ao desequilíbrio das cargas por fase, surge com um valor considerável, comprovando que uma carga desequilibrada pode provocar correntes muito elevadas no condutor de neutro das instalações elétricas. Este teste é muito importante porque demonstra ao mesmo tempo o comportamento de uma carga não-linear no sistema elétrico e a importância de um sistema equilibrado, porque a corrente de neutro no teste anterior era residual e neste teste a corrente de neutro assume valores muito consideráveis provocados por esta carga desequilibrada.

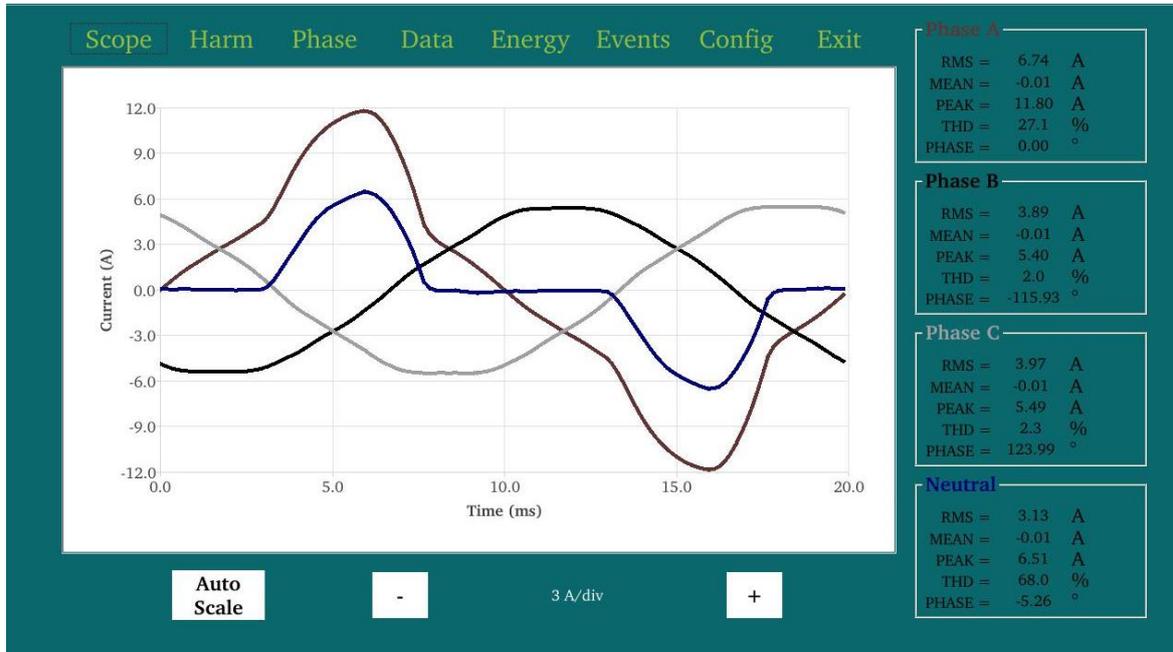


Figura 5.16 - Carga Não-Linear: menu *Scope* mostrando as correntes.

Para esta carga foi ainda feito um teste ao conteúdo harmónico que existia nas tensões e nas correntes deste sistema. Em primeiro lugar foi realizado o estudo das amplitudes harmónicas e do THD das tensões (Figura 5.17), em que se verifica que o conteúdo harmónico das tensões nas fases B e C se mantém praticamente igual ao conteúdo harmónico do teste anterior. Na fase A verifica-se que houve um aumento significativo do conteúdo harmónico, por os motivos descritos na análise das formas de onda das tensões que foi feita para esta carga.

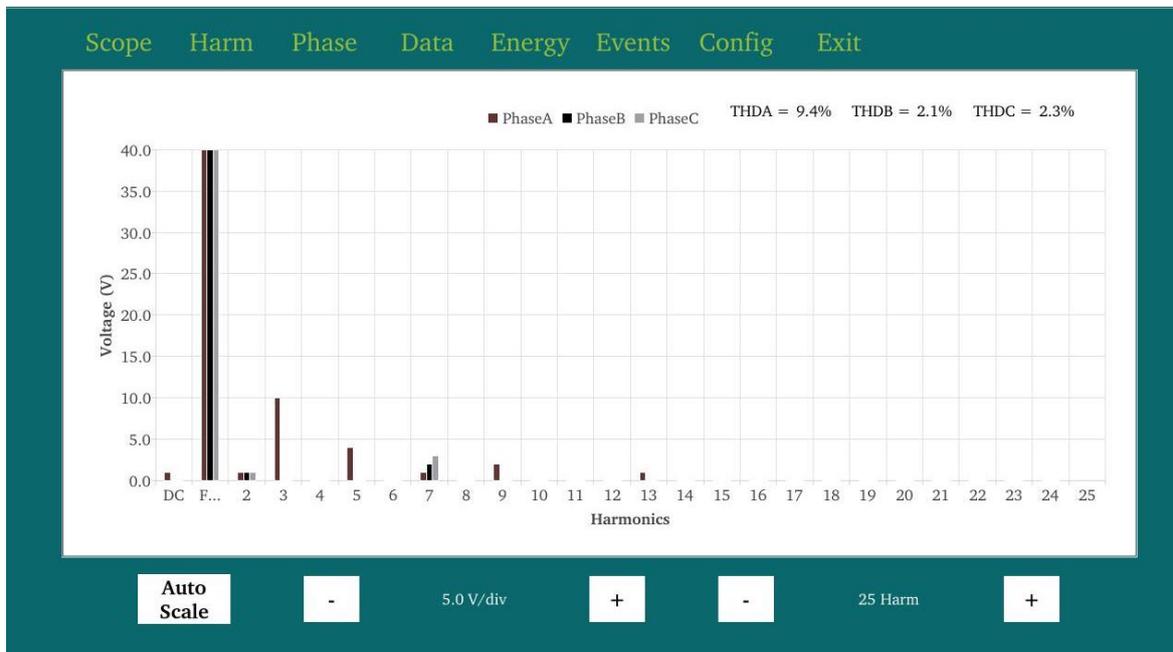


Figura 5.17 - Carga Não-Linear: menu *Harm* mostrando as harmónicas das tensões.

No menu *Harm* foi também possível realizar uma verificação das amplitudes harmónicas existentes nas correntes consumidas por esta carga. Na Figura 5.18 é possível identificar o resultado obtido neste teste, em que se nota um aumento significativo do THD da corrente na fase A em relação ao teste anterior. Por outro lado, o THD das correntes nas fases B e C mantém-se praticamente igual, como era de prever, visto que a carga nestas fases manteve-se em relação ao teste anterior.

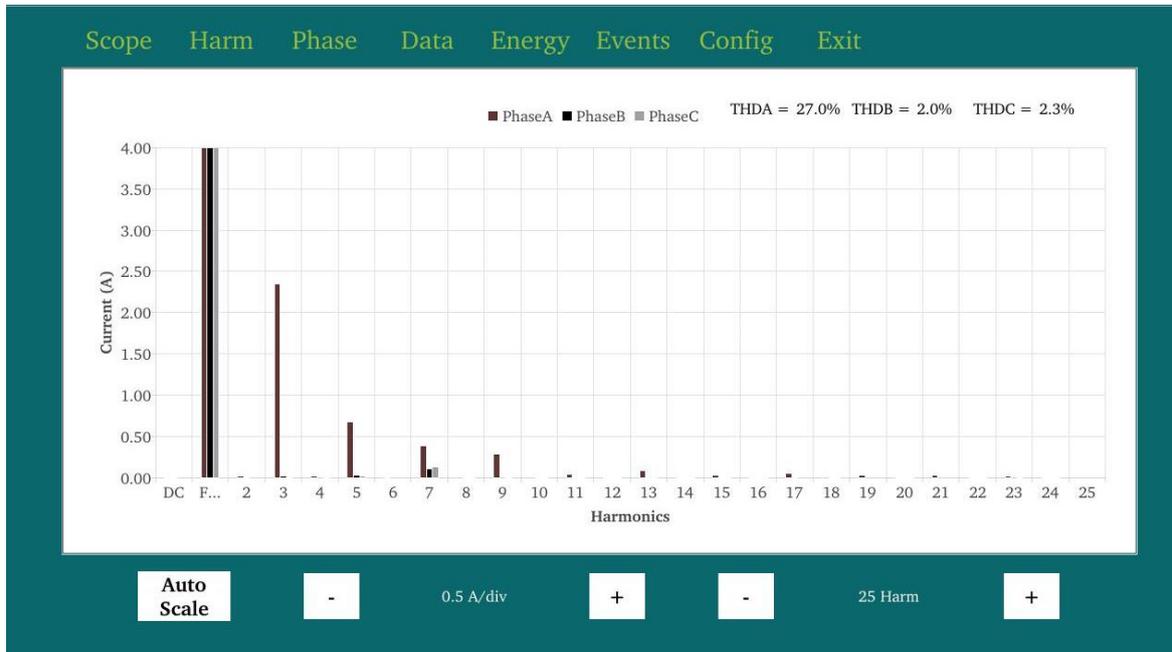


Figura 5.18 - Carga Não-Linear: menu *Harm* mostrando as harmónicas das correntes.

Por fim, neste teste foi visualizado o valor de todos os parâmetros calculados, recorrendo ao menu *Data*. Neste verifica-se que o valor eficaz da corrente, o valor de pico da corrente, o THD na corrente e as potências na fase A são mais elevados que nas restantes fases, como era previsto, visto que a carga foi aumentada nesta fase. Na Figura 5.19 visualiza-se o resultado fornecido pelo menu *Data*.

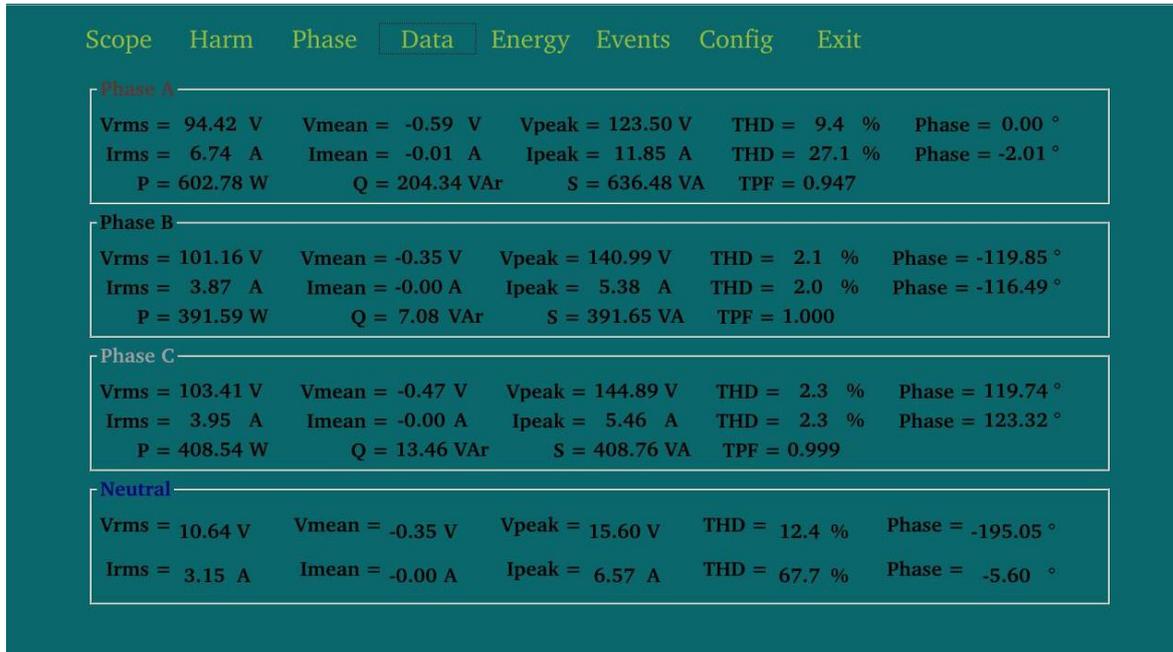


Figura 5.19 - Carga Não-Linear: menu *Data*.

5.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos com o sistema de monitorização implementado no âmbito do tema selecionado. Numa primeira fase foram apresentados os resultados de todos os menus para uma carga linear e em seguida foram expostos os resultados obtidos com o acoplamento de uma carga não-linear à fase A do sistema. Para todos os testes efetuados foi utilizado um variac para regular os valores das tensões lidas, permitindo desta forma a deteção de eventos de QEE. O valor nominal da tensão foi definido a 100 V em vez dos 230 V como seria espectável. Como este sistema de monitorização permite efetuar leituras de consumos energéticos, foi também demonstrado o funcionamento do menu *Energy* onde é possível visualizar o cálculo do consumo de energia elétrica num dado período de tempo.

Os resultados obtidos pelo sistema de monitorização implementado são muito satisfatórios, visto que se conseguiu comprovar o funcionamento de todos os menus implementados. Com os testes efetuados foi possível visualizar as formas de onda das tensões e das correntes, o conteúdo harmónico das tensões e das correntes, e os valores de todos os parâmetros que foram calculados por este. Também foi possível visualizar a deteção de eventos de QEE e verificar a informação detalhada sobre cada um dos eventos ocorridos, embora estes tenham sido provocados pela ação de um variac. Por fim, foi possível calcular o valor da energia consumida pelas cargas, fornecendo informação detalhada do valor da energia consumida e do tempo que decorreu durante este cálculo.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões de Trabalho Futuro

6.1 Conclusões Gerais

O tema dos sistemas de monitorização de QEE é um tema atual e de grande interesse, pois a monitorização de problemas de qualidade de energia é do interesse dos consumidores, dos produtores, dos distribuidores de energia elétrica e dos fabricantes de equipamentos elétricos. Devido a isso, este tema de dissertação foi abordado com o maior empenho e dedicação, para que o resultado final deste trabalho fosse o mais eficiente possível e se aproximasse o mais possível de um produto comercializável. Com o desenvolvimento deste aparelho foi possível absorver conhecimentos na criação de hardware e no desenvolvimento de software.

Hoje em dia os sistemas de monitorização são equipamentos muito importantes na avaliação dos sistemas de entrega e distribuição de energia elétrica, por isso no Capítulo 2 foi realizado um estudo no âmbito dos problemas de qualidade de energia. Foram apresentados os problemas de QEE, assim como as prováveis causas, as possíveis consequências e algumas soluções já estudadas e implementadas em alguns casos reais. Para realizar o estudo de QEE foi imprescindível recorrer à leitura de normas que identificam e limitam os problemas da energia elétrica conhecidos. Embora o acesso às normas de QEE seja um pouco complicado, pois as normas necessitam de ser adquiridas às entidades normativas, o GEPE facilitou o acesso à norma NP EN 50160 para que fosse possível realizar o estudo normativo dos problemas de qualidade de energia, e para que fosse possível elaborar algumas definições neste mesmo âmbito. Para que a informação fornecida sobre os problemas de QEE fosse mais concisa e mais perceptível foram simulados alguns destes problemas, com o recurso à ferramenta de simulação de circuitos de eletrónica de potência PSIM, para que a informação descrita fosse acompanhada pelas formas de onda provocadas por os problemas descritos. Estas simulações por vezes não foram obtidas de imediato, sendo necessário recorrer a informação detida em algumas publicações sobre os problemas de QEE.

O protótipo desenvolvido no âmbito desta dissertação fez-se acompanhar um vasto estudo do estado da arte, ou seja, para a formulação deste projeto foi realizado um estudo sobre os equipamentos que existem no mercado para conhecer os aspetos fundamentais dos sistemas deste género. A pesquisa que foi realizada neste âmbito, como foi possível confirmar no

Capítulo 3, envolveu um estudo aprofundado sobre as empresas de referência neste nicho de mercado, para que os produtos aqui apresentados fossem também produtos de referência. Por vezes a obtenção de informação de produtos e das empresas que os constrói é difícil, no entanto, foi possível apresentar dois produtos únicos nas suas características, quer a nível de software, quer a nível de hardware, pois estes equipamentos combinam o melhor destes dois mundos, sendo um destes produtos da Dranetz Technologies e o outro da Fluke Corporation. No entanto, no estudo sobre estes equipamentos foi também realizado um estudo aprofundado sobre os custos de aquisição dos produtos ao que se pode concluir que ainda é muito dispendioso obter equipamentos deste género. Foi também caracterizada uma solução já implementada no GEPE, no âmbito de uma dissertação de mestrado, na qual se pode apurar as principais características a nível de hardware e identificar as diferentes aplicações desenvolvidas no mesmo.

Com o estudo dos problemas de qualidade de energia elétrica e do estado da arte é possível concluir que é motivador e útil criar um sistema de monitorização de qualidade de energia elétrica e de consumos com uma boa performance e de baixo custo. Posto isto, para a formulação desta solução foram utilizados sensores baseados no efeito de Hall, uma placa de condicionamento de sinal com ADC integrado, uma placa de desenvolvimento genérica que pode ser programada com o auxílio do ambiente de desenvolvimento CCS, e uma *Raspberry Pi*. A nível de hardware o custo deste projeto ronda os 600 euros, em que cerca de 30% deste valor é o preço do monitor utilizado. A placa de desenvolvimento é um dos fatores de sucesso neste sistema de monitorização, pois esta permite que a aquisição de dados e que todas as interfaces de comunicações sejam tratadas por um processador ARM M3 e que o tratamento da informação seja executado com o recurso ao DSP C28. Estes dois aspetos foram cruciais na execução deste projeto, pois permitiram que a velocidade de aquisição de sinal fosse elevada e que o tratamento dos dados recolhidos fosse feito com o devido tempo, para que não fossem comprometidos os dados mostrados a um futuro utilizador. No entanto, este processo é muito minucioso porque todos os cálculos necessitam estar sincronizados com o processo de aquisição, esta pode se dizer a tarefa mais difícil, pois os algoritmos de cálculo necessitaram de ser otimizados e ajustados à escala de tempo disponibilizada para efetuar todos os cálculos. No Capítulo 4, na descrição de software foram disponibilizados todos os algoritmos e técnicas que foram imprescindíveis na realização do software para a placa de desenvolvimento e tratamento de dados.

No Capítulo 4 foram tratados todos os algoritmos de cálculo utilizados, sendo apresentadas algumas fórmulas de cálculo tanto em tempo contínuo como em tempo discreto definidas as

variáveis necessárias a cada cálculo. As fórmulas de cálculo foram fórmulas genéricas das quais se pode retirar a informação necessária para a implementação do software. Em alguns casos foi utilizada uma janela deslizante para que a atualização dos valores fosse mais precisa, este processo é determinante para a precisão dos valores em tempo real. Com esta velocidade de cálculo é possível detetar uma variação brusca do valor eficaz da tensão ou da corrente, o que facilita a deteção de eventos de QEE. Os eventos de QEE que foram implementados seguem o algoritmo apresentado pelo fluxograma da Figura 4.18. Este foi um processo um pouco difícil de implementar, pois foi necessário sincronizar a deteção de três eventos, respeitando os limites impostos pela norma NP EN 50160, tanto para os limites de tensão como para os limites de tempos destes eventos.

A nível do software foram ainda habilitadas múltiplas interfaces de comunicação, em que o processador ARM M3 foi sempre selecionado como o gerenciador dessas comunicações, das quais se destacam a comunicação via *shared* RAM com o DSP C28, a comunicação via I2C com o RTC, a comunicação SSI com um cartão micro SD e a comunicação Ethernet com a *Raspberry Pi*. A comunicação Ethernet foi a comunicação que ofereceu mais resistência à sua implementação, pois o conhecimento sobre redes de computadores e de protocolos orientados a IP é um pouco limitado, o que se refletiu na dificuldade sentida na implementação desta comunicação. O software de alto nível, também abordado no Capítulo 4, criado em *Qt-Linux* para a *Raspberry Pi* começou por criar alguns problemas na sua realização devido ao desconhecimento de alguns métodos de programação essenciais para o desenvolvimento de software utilizando esta plataforma. No entanto, ultrapassado o problema de adaptação ao ambiente de desenvolvimento, a construção e desenvolvimento do software para a interface gráfica fluíu normalmente devido aos conhecimentos já adquiridos da linguagem de programação C++.

No Capítulo 5 foram apresentados todos os resultados obtidos com o sistema de monitorização implementado, através dos quais se pode confirmar o funcionamento deste sistema. Para a realização dos testes ao sistema de monitorização foram utilizadas cargas que já existiam no laboratório do GEPE, foi também utilizado um variac, facilitando deste modo o processo de simular eventos de QEE. Para a validação de resultados foram utilizadas duas cargas diferentes em que a primeira carga era puramente resistiva e equilibrada e a segunda era uma carga não-linear monofásica que foi conectada à fase A e a primeira carga foi mantida, ou seja, na fase A carga não-linear foi conectada em paralelo com a carga resistiva que já se encontrava conectada e as outras fases mantiveram a mesma carga. Desta forma foi possível desequilibrar as cargas para que fosse possível testar e validar o valor da corrente de

neutro. Por este sistema não ter sido conectado diretamente a rede o valor eficaz nominal foi definido como 100 V, em vez dos esperados 230 V. Com os testes realizados ao sistema de monitorização pode-se concluir que o processo de construção deste equipamento foi concluído com êxito.

6.2 Sugestões de Trabalho Futuro

Ao longo desta dissertação foram apresentados muitos conceitos fundamentados numa vasta bibliografia e numa grande quantidade de ensaios que foram executados ao sistema de monitorização desenvolvido. No entanto, como é atual e trabalhoso e como o tempo para resolução da dissertação de mestrado é limitado, não foi possível executar alguns processos. Como tal, fica aqui uma lista de sugestões de trabalho futuro:

- Criar uma placa de condicionamento de sinal e de ADC baseada em componentes SMD (Surface-Mount Device) o que diminui significativamente o tamanho da solução.
- Utilizar outro tipo de fichas, porque as que foram utilizadas são suscetíveis a desconexões.
- Criar uma fonte de alimentação externa de forma a reduzir o peso e o tamanho do equipamento.
- Acoplar uma bateria para que o equipamento funcione mesmo que ocorra uma falha de energia.
- Criar uma caixa compacta de forma que a portabilidade do equipamento seja mais prática e confortável para o utilizador.
- Estudar e testar técnicas de deteção de *flicker* e de *voltage transient*.
- Estudar e implementar outras normas de qualidade de energia para que o aparelho se faça acompanhar com diversos métodos de avaliação da QEE.
- Estudar o acoplamento de uma tecnologia de comunicação sem fios para que os dados possam ser obtidos remotamente.

Referências

- [1] M. S. C. Venkatesh, D. Srikanth Kumar, D.V.S.S. Siva Sarma, “Modelling of Nonlinear Loads and Estimation of Harmonics in Industrial Distribution System,” *Fifteenth Natl. Power Syst. Conf. IIT Bombay, D*, 2008.
- [2] S. Khalid and B. Dwivedi, “Power quality issues, problems, standards and their effects in industry with corrective means,” *Int. J. Adv. Eng. Technol.*, 2005.
- [3] S. Bhattacharyya and S. Cobben, “Consequences of Poor Power Quality – An Overview, Power Quality, Mr Andreas Eberhard (Ed.),” *InTech*, 2011.
- [4] M. H. J. Bollen and I. Y. H. Gu, *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. Wiley-IEEE Press, 2006.
- [5] “Norma Portuguesa EN 50160, Características da tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia eléctrica.” .
- [6] V. Smith, “Voltage Sag Mitigation,” *Endeav. Energy*, 2012.
- [7] R. P. Bingham, “Sags and Swells,” 1998.
- [8] S. Bhavsar, P. V. A. Shah, and V. Gupta, “Voltage Dips and Short Interruption Immunity Test Generator As per IEC 61000 – 4 – 11 Sneha,” *Fifteenth Natl. Power Syst. Conf. (NPSC), IIT Bombay*, no. December, pp. 137–141, 2008.
- [9] J. Carron, “Emergency power system basics : Maintaining always-on power for reliable healthcare,” *EATON*, 2016.
- [10] E. Electrical, “Generator Quick Connect Switchboard for Hospitals,” 2005. [Online]. Available: www.eatonelectrical.com. [Accessed: 16-Sep-2016].
- [11] R. N. Nandeshwar, “Lightening And Lightening Protection of Overhead Transmission Line,” *Summer Fellowsh. Progr.*, 2014.
- [12] J. Seymour, “The Seven Types of Power Problems - White Paper 18,” 2015. [Online]. Available: <http://www.schneider-electric.com/>. [Accessed: 30-Sep-2016].
- [13] Marian K. Kazimierczuk and C. Dariusz, *Resonant Power Converters*, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. - IEEE, 2011.
- [14] IEEE Std 519-1992, “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems,” *IEEE Std 519-1992*. New York, 1993.
- [15] A. Kamenka, “Six tough topics about harmonic distortion and Power Quality indices in electric power systems - White Paper,” 2014. [Online]. Available: <http://www.schaffner.com/>. [Accessed: 09-Oct-2016].
- [16] J. R. Macedo Jr. and D. S. L. Simonetti, “Análise de desempenho do flickermeter na presença de componentes inter-harmônicas,” *Sba Control. Automação Soc. Bras. Autom.*, vol. 23, no. 4, pp. 508–519, 2012.
- [17] Erich W. Gunther and G. Finlay, “Interharmonics in Power Systems,” *IEEE*, 1997.
- [18] R. Ghandehari and A. Shoulaie, “Evaluating voltage notch problems arising from AC/DC converter operation,” *IEEE Trans. Power Electron.*, 2009.
- [19] J. S. Martins, C. Couto, and J. L. Afonso, “Qualidade de energia eléctrica,” *3º Congr. Luso-Moçambicano Eng. – CLME’*, 2003.

- [20] G. Skibinski, J. Pankau, R. Sladky, and J. Campbell, "Generation, control and regulation of EMI from AC drives," *Conf. Rec. 1997 IEEE Ind. Appl. Conf. Thirty-Second IAS Annu. Meet.*, 1997.
- [21] A. Hesener, "Electromagnetic Interference (EMI) in Power Supplies," *Fairchild Semicond. Power Semin.*, 2011.
- [22] Schaffner, "Basics in EMC / EMI and Power Quality Introduction, Annotations, Applications," 2013. [Online]. Available: <http://www.schaffner.com/>. [Accessed: 11-Sep-2016].
- [23] A. K. Zeimer, "The Effect of DC Current on Power Transformers," University of Southern Queensland Faculty, 2000.
- [24] M. Heindl, M. Beltle, M. Reuter, D. Schneider, S. Tenbohlen, D. T. Oyedokun, and C. T. Gaunt, "Investigation of GIC Related Effects on Power Transformers using Modern Diagnostic Methods," *XVII Int. Symp. High Volt. Eng. Hann. Ger.*, 2011.
- [25] V. J. Gosbell, "Voltage fluctuations in the electric supply systems," *Integr. Energy*, 2003.
- [26] Z. Hanzelka and A. Bien, "Voltage Disturbances - Flicker Measurement," *Power Qual. Appl. Guid.*, 2005.
- [27] W. L. Fuchs and E. F. Fuchs, "Frequency Variations of Power System Due to Switching of Renewable Energy Sources," *Int. Conf. Renew. Energies Power Qual.*, 2012.
- [28] J. Driesen and T. Van Craenenbroeck, "Voltage Disturbances: Introduction to Unbalance," *Copp. Dev. Assoc.*, 2002.
- [29] P. Pillay and M. Manyage, "Definitions of Voltage Unbalance," *IEEE Power Engeneering Rev.*, 2001.
- [30] Dranetz Technologies, "Dranetz Company Information," 2014. [Online]. Available: <http://www.dranetz.com>. [Accessed: 20-Dec-2016].
- [31] Dranetz Technologies, "Abe Dranetz, The Father of Power Quality," 2015. [Online]. Available: <http://www.dranetz.com/>. [Accessed: 20-Dec-2016].
- [32] Dranetz Technologies, "PowerXplorer PX5 - USER'S GUIDE," 2003. [Online]. Available: <http://www.dranetz.com/>. [Accessed: 15-Sep-2016].
- [33] Fluke Corporation, "Fluke Corporate Profile." [Online]. Available: <http://www.fluke.com/>. [Accessed: 20-Dec-2016].
- [34] FundingUniverse, "Fluke Corporation History." [Online]. Available: <http://www.fundinguniverse.com/company-histories/>. [Accessed: 20-Dec-2016].
- [35] Fluke Corporation, "Fluke 1736 and 1738 Three-Phase Power Loggers KEY - TECHNICAL DATA," 2015. [Online]. Available: <http://www.fluke.com/>. [Accessed: 01-Oct-2016].
- [36] Fluke Corporation, "1736/1738 Power Logger - User Manual," 2015. [Online]. Available: <http://www.fluke.com/>. [Accessed: 01-Oct-2016].
- [37] J. Batista, "Sistema de Monitorização da Qualidade de Energia Eléctrica baseado em PC.," Universidade do Minho, 2004.
- [38] R. Alves, "Sistema de Monitorização de Consumos Energéticos e de Problemas de Qualidade de Energia Eléctrica.," Universidade do Minho, 2008.
- [39] M. Ribeiro, "Desenvolvimento de um Monitorizador de Energia Eléctrica Portátil.," Univeridade do Minho, 2010.

-
- [40] ChenYang Technologies GmbH & Co. KG, “Datasheet Hall Effect Voltage Sensor CYHVS5-25A.” [Online]. Available: <http://www.cy-sensors.com/>. [Accessed: 18-Apr-2016].
- [41] LEM, “Datasheet Current Transducer LA 100-P.” [Online]. Available: <http://www.lem.com/>. [Accessed: 18-Apr-2016].
- [42] S. Winder, *Analog and Digital Filter Design*, 2 nd. Elsevier Science, 2002.
- [43] R. Mancini, “Op Amps for Everyone,” *Texas Instruments Des. Ref.*, no. August, 2002.
- [44] Maxim, “Datasheet MAX1320.” [Online]. Available: <https://www.maximintegrated.com/>. [Accessed: 18-Apr-2016].
- [45] Texas Instruments, “Datasheet F28M35x Concerto™ Microcontrollers.” [Online]. Available: <http://www.ti.com>. [Accessed: 18-Apr-2016].
- [46] Raspberry Pi Foundation, “Raspberry Pi 3 Model B.” [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org/>. [Accessed: 01-Aug-2016].
- [47] Lilliput, “Lilliput 669GL-70NP/C.” [Online]. Available: <http://www.lilliputuk.com/>. [Accessed: 01-Aug-2016].
- [48] Stan Gibilisco, *The Illustrated Dictionary of Electronics*, 8th ed. McGraw-Hill, 2001.
- [49] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, and J. R. Buck, *Discrete Time Signal Processing*, 2nd ed. Prentice-Hall, Inc., 1999.
- [50] Texas Instruments, “C28x Floating Point Unit DSP Library - USER’S GUIDE.” [Online]. Available: <http://www.ti.com/>. [Accessed: 15-Sep-2016].

Anexo A

Coeficientes do filtro Butterworth [43].

n	i	a _i	b _i	k _i = f _{ci} / f _c	Q _i
1	1	1.0000	0.0000	1.000	—
2	1	1.4142	1.0000	1.000	0.71
3	1	1.0000	0.0000	1.000	—
	2	1.0000	1.0000	1.272	1.00
4	1	1.8478	1.0000	0.719	0.54
	2	0.7654	1.0000	1.390	1.31
5	1	1.0000	0.0000	1.000	—
	2	1.6180	1.0000	0.859	0.62
	3	0.6180	1.0000	1.448	1.62
6	1	1.9319	1.0000	0.676	0.52
	2	1.4142	1.0000	1.000	0.71
	3	0.5176	1.0000	1.479	1.93
7	1	1.0000	0.0000	1.000	—
	2	1.8019	1.0000	0.745	0.55
	3	1.2470	1.0000	1.117	0.80
	4	0.4450	1.0000	1.499	2.25
8	1	1.9616	1.0000	0.661	0.51
	2	1.6629	1.0000	0.829	0.60
	3	1.1111	1.0000	1.206	0.90
	4	0.3902	1.0000	1.512	2.56
9	1	1.0000	0.0000	1.000	—
	2	1.8794	1.0000	0.703	0.53
	3	1.5321	1.0000	0.917	0.65
	4	1.0000	1.0000	1.272	1.00
	5	0.3473	1.0000	1.521	2.88
10	1	1.9754	1.0000	0.655	0.51
	2	1.7820	1.0000	0.756	0.56
	3	1.4142	1.0000	1.000	0.71
	4	0.9080	1.0000	1.322	1.10
	5	0.3129	1.0000	1.527	3.20