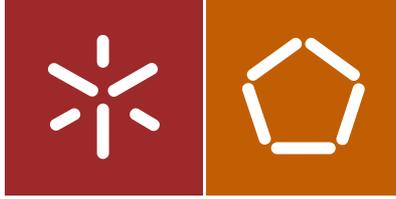




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Paulo Jorge Santos Pontes

Desenvolvimento de um
contador digital com leitura de harmónicos



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Paulo Jorge Santos Pontes

Desenvolvimento de um
contador digital com leitura de harmónicos

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de
Mestre em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

Trabalho efectuado sob a orientação do
Professor Doutor Manuel João Sepúlveda Mesquita de
Freitas

DECLARAÇÃO

Nome: Paulo Jorge Santos Pontes

Endereço eletrónico: pontes.pl01@gmail.com Telefone: 911533814

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 13767693

Título da dissertação: Desenvolvimento de um contador digital com leitura de harmónicos

Orientador:

Professor Doutor Manuel João Sepúlveda Mesquita de Freitas

Ano de conclusão: 2015

Mestrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta dissertação de mestrado foi um processo longo e não seria possível sem o apoio e ajuda de algumas pessoas, às quais quero deixar o meu agradecimento.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor João Sepúlveda, pela disponibilização do laboratório e de todos os aparelhos necessários para a finalização do projeto.

Aos funcionários do DEI, Joel Almeida, Carlos Torres e Ângela Macedo, por me receberem e ajudarem sempre que foi necessário.

Ao pessoal do GEPE (Grupo de Eletrónica de Potência e Energia) por toda a ajuda que me deram durante a realização desta dissertação.

Agradecer aos meus amigos que direta ou indiretamente me deram força e animo para terminar o curso.

Também gostaria de agradecer ao departamento da BOSCH da Universidade do Minho por me ter fornecido equipamentos para finalizar a dissertação.

Finalmente, um especial agradecimento a toda a minha família, em especial aos meus pais, Orlando e Fernanda Pontes, a minha irmã Patrícia, por toda a força e motivação que me deram ao longo destes anos que frequentei a Universidade do Minho, sem os quais a conclusão do curso não seria possível.

RESUMO

A qualidade da energia entregue aos consumidores finais possui um papel preponderante na sociedade atual. Nos dias de hoje, é cada vez mais importante utilizar a energia disponível da forma mais eficiente possível. A qualidade da energia tem vindo a ser alvo de grande interesse por parte da comunidade científica, tendo mesmo sido objeto de muitos estudos e investigações. Os avanços tecnológicos na área de sistemas de energia permitiram uma melhor mitigação dos problemas que afetam a rede, e, como consequência, a eficiência da distribuição de energia tem vindo a ser gradualmente melhorada.

O objetivo desta dissertação passa por descobrir os efeitos dos harmónicos, nos contadores de energia elétrica de baixa tensão, bem como desenvolver um módulo eficiente para a leitura da energia consumida e de possuir a capacidade de fazer a verificação dos harmónicos presentes no sistema.

Os dois tipos de medidores de energia elétrica mais utilizados na rede de baixa tensão são o eletromecânico e o digital. Regra geral, os contadores digitais são bastante mais precisos e exatos do que os eletromecânicos e os efeitos da distorção harmónica são bastante mais perceptíveis nos contadores eletromecânicos. A diferença entre eles poderá não ser muito relevante em baixa tensão, mas para média tensão deve ser considerada, principalmente para consumidores industriais. Esta diferença, deve-se ao facto de os contadores eletromecânicos se encontrarem calibrados para serem utilizados para funcionarem em condições sinusoidais, o que não acontece.

Para efetuar a leitura do consumo das cargas, foram utilizados dois sensores (corrente e tensão), devidamente acoplados a um sistema de acondicionamento de sinal de forma a serem corretamente lidos pelo ADC. Para efetuar a análise das leituras foi utilizado o DSP TMS320F28027 da *Texas Instruments*.

Palavras-Chave: Contadores, Redes inteligentes, Harmónicos, Qualidade da Energia.

ABSTRACT

The quality of the power delivered to the final consumer has a hugely significant role in today's society, for it's becoming increasingly more important to utilize the still available energy in the most efficient way possible.

A target of great interest by the scientific community, power quality has been the object of many scientific studies and investigations. The technological advances in energy systems have allowed for a better mitigation of issues affecting the grid and as a result, energy distribution has been gradually improved, becoming more and more efficient.

The main purpose of this dissertation is to figure out the effects of harmonics in lower voltage electrical meters, as well as developing an efficient module for accounting consumed energy and for verifying harmonics present in the system.

There are two types of electrical energy meters more commonly used in lower voltage grids, which are electromechanical and digital. The effects of harmonic distortion are a lot more perceptible in electromechanical meters. Although the difference between the two isn't very significant in low voltage, it must be accounted for when it comes to medium voltage, especially for industrial consumers. Said difference is owed to the fact that electromechanical meters are calibrated to be used in sinusoidal conditions, which mostly ends up not happening.

As to perform a proper reading of the consumption of the loads, two sensors (current and voltage) were used, properly tied to a signal conditioning system as to be properly read by the ADC. The analysis of the readings was done via a Texas Instruments' DSP TMS320F28027.

KEYWORDS: Counters, Smart Grids, Harmonics, Power Quality.

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract	vii
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Anexos.....	xvii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	xviii
Nomenclatura	XIX
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Motivação.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.4 Plano de trabalho	5
1.5 Organização da dissertação	6
2. Contadores	9
2.1 Introdução.....	9
2.2 Contador Eletromecânico	10
2.3 Contador Híbrido.....	12
2.4 Contador Estático	13
2.5 Evolução e distribuição dos contadores em Portugal Continental	14
3. SmartGrid.....	17
3.1 Introdução.....	17
3.2 InovGrid.....	19
3.3 EDP BOX	22
4. Qualidade da Energia Elétrica	23
4.1 Introdução.....	23
4.2 Subtensão Momentânea.....	24
4.3 Sobretensão Momentânea.....	24
4.4 Interrupção Momentânea.....	25
4.5 Transitórios.....	26
4.6 Flutuações de Tensão (<i>Flicker</i>)	27

4.7	Micro cortes de Tensão (<i>Notches</i>).....	28
4.8	Ruído	29
4.9	Harmônicos.....	30
4.10	Normalização da Qualidade da Energia Elétrica.....	32
5.	Energia.....	35
5.1	Introdução.....	35
5.2	Potência – Condições Sinusoidais	36
5.3	Potência – Condições Não Sinusoidais	39
5.4	Série de Fourier	42
6.	Arquitetura do Sistema	45
6.1	Alimentação do sistema.....	45
6.2	Sensor de Tensão de Efeito Hall.....	48
6.3	Sensor de Corrente de Efeito Hall	50
6.4	Condicionador de Sinal - Tensão.....	52
6.5	Condicionador de Sinal – Corrente	54
6.6	Digital Signal Processor	56
6.7	FLUKE 345 PQ <i>Clamp Meter</i>	58
6.8	<i>Raspberry pi</i> & MX6 Sabre.....	59
6.9	Explicação do Código.....	61
7.	Resultados.....	63
7.1	Ensaio Aquecedor.....	64
7.2	Ensaio Aquecedor com díodo.....	67
7.3	Ensaio de Ventoinha.....	69
7.4	Ensaio de Computador Portátil.....	74
7.5	Ensaio com ecrã TFT.....	76
7.6	Ensaio com Televisor	79
7.7	Ensaio com três cargas	81
7.8	Discussão de Resultados.....	84
8.	Conclusão e Trabalho Futuro.....	87
	Referências Bibliograficas	89
	Anexo I.....	93
	93
	Anexo II.....	93

Anexo III	94
Anexo IV	94
Anexo V	95
Anexo VI.....	97
Anexo VII.....	99
Anexo VIII	101
Anexo IX.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1.1 - Energia comercializada em Portugal [1]	1
Figura 1-2 - Diagrama de Gantt	6
Figura 2-1 - Esquema do aparelho eletromecânico [4]	9
Figura 2-2 - Interação entre as correntes de Foucault e os campos magnéticos durante quatro períodos de tempo no caso de uma carga resistiva [4]	11
Figura 2-3 - Contador Eletromecânico da Reguladora.....	12
Figura 2-4 - Contador Híbrido da JANZ [6]	12
Figura 2-5 - Contador Estático da JANZ	14
Figura 2-6 - Distribuição do número de contadores instalados pela EDP-D [7].....	15
Figura 2-7 - Evolução dos contadores no sector doméstico [8]	16
Figura 3-1 - Funções da Rede Inteligente [10].....	18
Figura 3-2 - Modelo de uma Rede Inteligente [11].....	18
Figura 3-3 - Parceiros do Projeto InovGrid [15]	21
Figura 3-4 - <i>Energy Box</i> usado no projeto InovGrid [7]	22
Figura 4-1 - Subtensão Momentânea (SAG) [20]	24
Figura 4-2 - Sobretensão Momentânea (SWELL) [20].....	25
Figura 4-3 - Interrupção Momentânea [20].....	26
Figura 4-4 - Transitório [20]	26
Figura 4-5 - Flutuação de Tensão [20]	28
Figura 4-6 - Micro cortes de Tensão (Notches) [20].....	29
Figura 4-7 - Ruído (Interferência eletromagnética) [20].....	29
Figura 4-8 - Exemplo da forma de onda distorcida e a sua decomposição [20]	30
Figura 4-9 - Inter-harmónicos [20].....	31
Figura 5-1 - Esquema PTDE (Produção, Transporte e Distribuição de Energia) [28].....	35
Figura 5-2 - potência nas condições sinusoidais ao longo do tempo (circuito resistivo: $U=10V$, $I=2A$, $R=10\Omega$)	37
Figura 5-3 - Conceito convencional para a potência ativa e reativa [31].....	38
Figura 5-4 - Tetraedro das potências [31]	41
Figura 6-1 - Alimentação do sistema (placa + transformador)	45
Figura 6-2 - Esquema fonte em <i>Psim</i>	46

Figura 6-3 - Tensão e Corrente (Transformador + Retificador) em <i>Psim</i>	46
Figura 6-4 - tensão e Corrente saída da fonte (Transformador + Retificador + condensador) em <i>Psim</i>	47
Figura 6-5 - Placa do sensor de Tensão (GEPE).....	48
Figura 6-6 - Esquemático simplificado do sensor CYHS025 [38].....	49
Figura 6-7 - Valores reais do sensor de tensão.....	49
Figura 6-8 - Placa sensor de Corrente (GEPE)	50
Figura 6-9 - Esquemático simplificado do sensor LA 55-p [39].....	51
Figura 6-10 - Valores reais lidos do sensor de corrente	51
Figura 6-11 - Placa acondicionador de tensão	52
Figura 6-12 - Somador Inversor para sensor de tensão	53
Figura 6-13 - Inversor ganho unitário + Zenner.....	53
Figura 6-14 - Placa acondicionador de corrente.....	54
Figura 6-15 - Somador Inversor para sensor de corrente	55
Figura 6-16 - Inversor ganho unitário + Zenner.....	55
Figura 6-17 - C2000 Piccolo LaunchPad Evaluation kit [40]	56
Figura 6-18 - Ambiente gráfico <i>Code Composer Studio</i>	57
Figura 6-19 - Fluke 345 PQ <i>Clamp Meter</i>	58
Figura 6-20 - Esquema Raspberry pi + pinos (UART)	59
Figura 6-21 – MX6 Sabre + <i>Display</i>	60
Figura 6-22 - Calculo RMS (método gráfico - tensão)	61
Figura 6-23 - Diagrama de blocos do sistema desenvolvido	62
Figura 7-1 - Bancada de testes do CEM (esquerda) e bancada de testes do sistema desenvolvido (direita).....	63
Figura 7-2 - Valores tensão do aquecedor.....	64
Figura 7-3 - Valores corrente do Aquecedor.....	64
Figura 7-4 - Valores do consumo do FLUKE 345 do aquecedor.....	65
Figura 7-5 - Valores do aquecedor a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345	66
Figura 7-6 - Valores tensão aquecedor com díodo.....	67
Figura 7-7 - Valores de Corrente aquecedor com díodo	67
Figura 7-8 - Valores consumo aquecedor com díodo	68
Figura 7-9 - Valores do aquecedor com díodo a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345	68
Figura 7-10 - Valores tensão e corrente ventoinha velocidade mínima.....	70

Figura 7-11 - Valores consumo velocidade mínima	70
Figura 7-12 - Valores da ventoinha nível 1 a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345 .	71
Figura 7-13 - Valores tensão e corrente ventoinha velocidade máxima	72
Figura 7-14 - Valores consumo ventoinha velocidade máxima.....	72
Figura 7-15 - Valores da ventoinha no nível 3 a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345	73
Figura 7-16 - Valores tensão de computador portátil.....	74
Figura 7-17 - Valores corrente do computador portátil.....	74
Figura 7-18 - Consumos computador portátil	75
Figura 7-19 - Valores do computador portátil a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345	75
Figura 7-20 - Valores tensão ecrã TFT	76
Figura 7-21 - Valores corrente ecrã TFT	77
Figura 7-22 - Consumo ecrã TFT.....	77
Figura 7-23 - Valores do ecrã TFT a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345	78
Figura 7-24 - Valores tensão televisor	79
Figura 7-25 - valores de corrente televisor.....	79
Figura 7-26 - Consumos televisor	80
Figura 7-27 - Valores do televisor a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345	80
Figura 7-28 - Valores tensão e corrente das três cargas em conjunto	81
Figura 7-29 - Consumo três cargas em conjunto.....	82
Figura 7-30 - Valores das três cargas a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 - Consumo Doméstico em Portugal [2].....	2
Tabela 2-1 - Características e funcionalidades (EDP - D)	15
Tabela 4-1 - Níveis de compatibilidade para diferentes harmónicos de tensão numa rede BT [25]	33
Tabela 6-1 - Pontos do método gráfico (tensão)	62
Tabela 7-1- Leitura dos Ensaios Realizados	84

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 - Principais fenómenos que causam perturbações eletromagnéticas classificados pelo IEC [19].....	93
Anexo 2 - Características dos fenómenos eletromagnéticos nos sistemas de potência [19]....	93
Anexo 3 - Exemplo de transitório impulsivo (esquerda) e de um transitório oscilatório (direita) [18]	94
Anexo 4 - (a) fluxo da potência na frequência fundamental; (b) fluxo dos harmónicos de potência [24].....	94
Anexo 5 - Guias, recomendações e padrões na qualidade elétrica [22].....	95
Anexo 6 - Guias, recomendações e padrões na qualidade elétrica [22] (continuação)	96
Anexo 7 - Características LM7915 [36]	97
Anexo 8 - Características LM7815 [37].....	97
Anexo 9 - Características LM7805 [37].....	98
Anexo 10 - Características CYHS025A.....	99
Anexo 11 - Características LA 55-p [39]	100
Anexo 12 - Esquemático da placa TMS320F28027 [40].....	101
Anexo 13 - Especificações FLUKE 345 PQ <i>Clamp Meter</i>	102
Anexo 14 - Especificações FLUKE 345 PQ <i>Clamp Meter</i> (continuação)	103
Anexo 15 - Especificações FLUKE 345 PQ <i>Clamp Meter</i> (continuação)	103

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

BT	<i>Baixa Tensão</i>
QEE	<i>Qualidade da Energia Elétrica</i>
CEM	<i>Contador Eletromecânico</i>
CE	<i>Contador Estático</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
EDP-D	<i>EDP Distribuição</i>
EB	<i>Energy Box</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
TIHD	<i>Total Inter-Harmonic Distortion</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
TDD	<i>Total Demand Distortion</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
CEA	<i>Consumer Electronics Association</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BS	<i>British Standards</i>
EN	<i>European Standards</i>
CBEMA	<i>Computer and Business Equipment Manufacturers Association</i>
ITIC	<i>Information Technology Industry Council</i>
VDE	<i>Verband Der Elektrotechnik (DE)</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
EE	<i>Energia Elétrica</i>
CA	<i>Corrente Alternada</i>
CC	<i>Corrente Contínua</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
CCS	<i>Code Composer Studio</i>

NOMENCLATURA

Significado	Unidade
Frequência	Hz
Período	s
pu	%
Tensão	V
Corrente	A
Resistência	Ω
Volt – Ampere	va
Volt – Ampere Reativo	var
Microssegundos	μs
Milissegundos	ms

1. INTRODUÇÃO

A invenção da energia elétrica transformou o mundo. O ramo industrial preocupa-se cada vez mais com a qualidade da energia e os custos da mesma. Dado que os consumos de energia elétrica devem ser contabilizados por razões económicas e de eficiência energética, torna-se interessante desenvolver um contador de energia digital e robusto, capaz de contabilizar as componentes harmónicas e a energia consumida. Este é um capítulo introdutório onde se pode observar o enquadramento, as motivações, os objetivos e um plano estruturado da organização da dissertação.

1.1 Enquadramento

O Mundo atual está em constante mudança. Um dos principais responsáveis desta transformação é o ser Humano, pois a necessidade de se desafiar a si próprio leva à criação de novas metas e, conseqüentemente, a um avanço significativo da tecnologia. Atualmente pode-se encontrar o termo “tecnologia” ligado a tudo o que nos rodeia, sobretudo quando se fala de inovação.

Uma das grandes inovações do passado foi a produção de energia elétrica, a qual contribuiu para uma enorme transformação na indústria e na sociedade que perdura até aos dias de hoje. Também a elevada versatilidade da eletricidade, como fonte de energia, produziu um conjunto ilimitado de aplicações, tais como o aquecimento, a iluminação, os transportes, as comunicações e a computação.

O consumo de energia em Portugal tem vindo a aumentar ao longo do tempo, tal como pode ser observado pela figura 1.1.



Figura 1-1.1 - Energia comercializada em Portugal [1]

Através da análise da figura 1.1, constata-se uma ligeira descida no consumo final de energia a partir do ano de 2010. Este decréscimo prende-se com as dificuldades económicas que o país atravessa e a austeridade implementada, fazendo com que o rendimento disponível das famílias seja menor e, simultaneamente, obrigando a cortes orçamentais nos custos das empresas.

Tabela 1-1 - Consumo Doméstico em Portugal [2]

	Total	Doméstico
+ 1994	27.751.311.565	7.350.104.713
2000	38.939.469.070	10.056.118.861
2001	40.540.701.913	10.624.533.591
2002	42.116.729.684	11.381.968.792
2003	43.802.993.542	11.835.470.870
2004	45.498.596.452	12.432.290.454
2005	47.028.809.174	13.242.117.759
2006	48.545.712.359	13.406.261.524
2007	49.676.041.662	13.863.085.380
2008	49.186.865.934	13.443.517.549
2009	48.772.938.876	14.187.915.617
2010	(R) 50.505.481.187	(R) 14.487.669.263
2011	49.153.243.791	13.754.768.280
2012	47.130.362.835	12.898.001.944
2013	Pro 46.272.307.086	Pro 12.311.421.882

Também o consumo doméstico revela, à semelhança do observável na Figura 1.1, um aumento significativo até 2010 e uma ligeira descida nos anos posteriores.

Através da análise dos dados da Figura 1.1 e da Tabela 1.1, torna-se evidente que os consumos de energia eléctrica devem ser contabilizados por razões económicas e de eficiência energética. Por este motivo, surge a necessidade de desenvolver um equipamento eletrónico capaz de efetuar leituras dos consumos em tempo-real que seja menos suscetível a erros de medida.

O desenvolvimento da eletrônica de potência fez com que os dispositivos eletrônicos se tornassem muito mais eficientes, porém isso acarretou outros problemas como a degradação da qualidade de energia, situação a que não se dava muita importância.

A utilização dos equipamentos eletrônicos em grande escala introduziu na comunidade científica uma maior preocupação no que diz respeito à qualidade de energia. A forma como esta é gerada na rede e distribuída ao consumidor final passou a ser objeto de estudo, fazendo com que se criassem soluções para colmatar estas irregularidades na energia. Um dos grandes responsáveis pela degradação da QEE prende-se com a existência de harmônicos no sistema.

Os harmônicos são frequências múltiplas da fundamental, estes são gerados por cargas não-lineares. Estas cargas, por sua vez, quando expostas a um sinal elétrico de frequência fixa, apresentam como resposta uma forma de onda diferente da forma de onda de alimentação. Alguns exemplos destas cargas são os fornos de indução, as lâmpadas de descarga, os conversores eletrônicos, os computadores pessoais e muitos outros equipamentos.

O problema dos harmônicos não era tão evidente no passado devido a uma maior utilização de cargas lineares. Com os avanços na eletrônica de potência passaram a ser usadas cada vez mais cargas não-lineares, contribuindo para a degradação da qualidade da energia e para que a leitura dos contadores existentes não fosse a mais correta.

Um contador de energia elétrica é um equipamento eletrônico capaz de medir o consumo de energia elétrica. Este pode ser ligado diretamente entre a rede elétrica e a carga, ou através de transformadores de acoplamento de tensão / corrente. A rede elétrica pode ser de alta, média e baixa tensão. No âmbito deste trabalho, serão abordadas as redes de baixa tensão onde são geralmente utilizados medidores de classe 2, que apresentam um erro percentual inferior a 2,00%. [2]

A diferença da leitura da energia poderá não ser muito relevante em baixa tensão, contudo para a média tensão deve ser considerada, principalmente para consumidores industriais. Esta diferença prende-se com o facto dos contadores se encontrarem calibrados para serem utilizados em condições sinusoidais, o que não acontece. [3]

O problema de se possuir harmônicos no sistema é que, quando ocorrem variações na tensão, corrente e frequência de alimentação, os equipamentos estarão sujeitos a apresentar falhas, mau funcionamento entre muitos outros problemas.

Este trabalho tem como propósito desenvolver um contador de energia elétrica digital robusto capaz de contabilizar as componentes harmônicas e a energia consumida. Estas informações serão exibidas em tempo-real, tendo o dispositivo um sistema de medições ligado a um processador de sinal digital.

Este dispositivo digital, comparado com os contadores eletromecânicos, é mais eficiente e permite uma maior variedade de funções. Através do sistema de monitorização digital, o *Software* pode ser programado para diversas funções, tais como alertar o pessoal técnico no momento em que ocorre um problema no sistema elétrico para uma rápida reparação do mesmo. Paralelamente pode registar todas as anomalias ocorridas no sistema e guardar essa informação em relatórios. No futuro, com a implementação das redes inteligentes, poderá comunicar em tempo real, partilhando informações com os centros de processamento e armazenamento de dados.

O principal objetivo desta dissertação passa então pelo desenvolvimento de um sistema capaz de fazer a contabilização da energia elétrica consumida bem como os harmônicos presentes no sistema elétrico, neste caso específico, harmônicos presentes num sistema de baixa tensão.

1.2 Motivação

A questão da qualidade de energia elétrica entregue aos consumidores finais é, hoje, objeto de grande preocupação. As empresas fornecedoras de energia elétrica e o ramo industrial preocupam-se cada vez mais com o problema da qualidade da energia. A medição e registo da energia elétrica é uma área atual de investigação e, como tal, existe sempre a necessidade de aperfeiçoar os serviços prestados. Torna-se imperioso melhorar a exatidão das medidas, assim como a qualidade da informação fornecida em tempo real ao consumidor.

Atualmente, o efeito dos harmônicos na rede doméstica ainda não causa grande preocupação nos seus consumidores, isto acontece devido à falta de conhecimento técnico destes na área. Com a massificação das “novas” tecnologias e um crescimento do uso de cargas não lineares, torna-se importante criar um sistema de medição eficiente. Assim existe a necessidade de conceber um aparelho de medida capaz de fornecer dados concretos acerca dos harmônicos gerados numa residência bem como problemas relativos à qualidade da energia elétrica.

Com a implementação das redes inteligentes, também haverá a necessidade de produzir aparelhos de medida precisos capazes de interagir com os centros de armazenamento e processamento de dados.

Pretende-se, com este trabalho, aplicar conhecimentos adquiridos na área de estudo de sistemas de energia assim como procurar soluções de baixo custo e com grande exatidão, que consigam ler e avaliar problemas na rede elétrica.

Espera-se que o trabalho efetuado ao longo da dissertação sirva como plataforma viável para que empresas ou outras entidades usem esta tecnologia. Num futuro próximo, com a implementação das redes inteligentes, será preciso elementos de contagem e medição de energia capazes de passar toda a informação gerada na rede assim como interagir com outros elementos da mesma.

1.3 Objetivos

Pretende-se com esta dissertação um estudo mais aprofundado dos problemas da qualidade de energia elétrica existentes na rede, nomeadamente, analisar os efeitos do problema dos harmónicos nos contadores de energia elétrica assim como desenvolver e implementar um contador digital com leitura de harmónicos de baixo custo, robusto, de grande exatidão, de forma a reduzir a sua sensibilidade a alterações de tensão e corrente presentes na rede.

Os principais objetivos desta dissertação são:

- Verificar o efeito dos harmónicos nos contadores de energia na rede elétrica;
- Estudar o comportamento dos contadores de energia elétrica;
- Implementar um sistema de medição de energia elétrica digital de baixo custo e robusto para rede de baixa tensão.

1.4 Plano de trabalho

Esta dissertação foi construída por diferentes etapas: (i) Realização da recolha bibliográfica e caracterização do estado da arte, procedendo-se então à recolha bibliográfica sobre os contadores de energia e os problemas que os afetam. Após essa recolha foi feita a descrição do estado da arte (3meses); (ii) Estudo dos efeitos dos problemas de QEE no sistema elétrico (1mês); (iii) Estudo comportamental dos contadores de energia elétrica

(1mês); (iv) Construção de um sistema de medida de grandezas elétricas (tensão e corrente) e acondicionamento dos mesmos (2meses); (v) Implementação de um sistema de aquisição de dados e respetivo processamento dos mesmos para contagem do consumo da energia (2meses); (vi) Procedimento a testes no sistema (1mês); (vii) Escrita da dissertação.

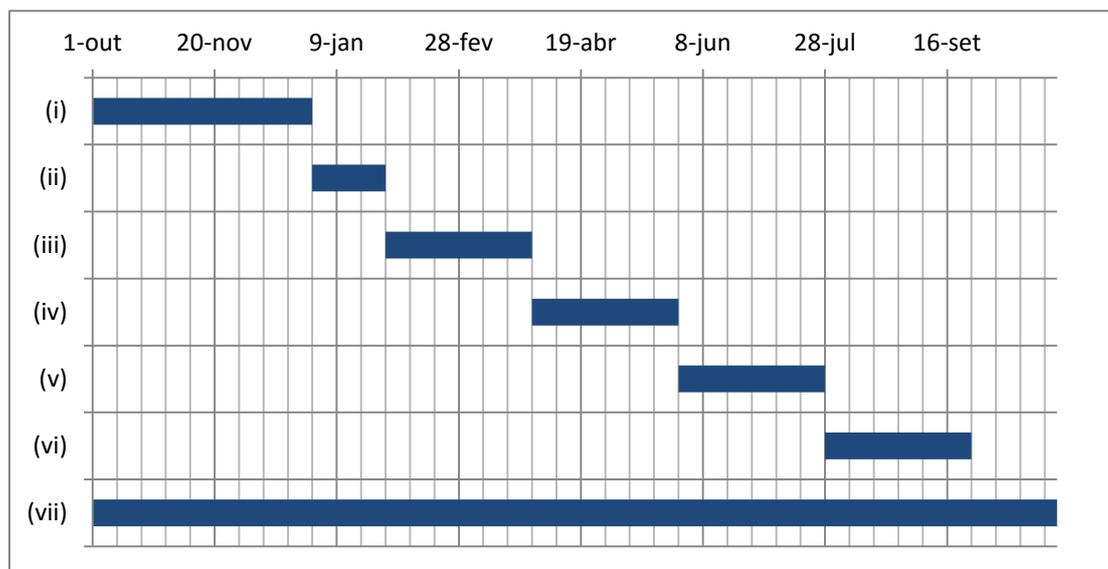


Figura 1-2 - Diagrama de Gantt

1.5 Organização da dissertação

Esta dissertação de mestrado assenta em sete capítulos.

No primeiro capítulo, “Introdução”, é apresentada uma curta introdução à tese dando a conhecer o enquadramento, motivações, os objetivos e a base do plano de trabalho.

No segundo capítulo, “Contadores”, é feita uma apresentação aos contadores existentes na rede e a sua distribuição em Portugal continental.

No terceiro capítulo, “SmartGrids”, apresenta-se um novo conceito das redes (redes inteligentes), as suas funções e vantagens, bem como o novo projeto-piloto implementado em Portugal e os componentes aí integrados.

No quarto capítulo, “Qualidade da Energia Elétrica”, são apresentados os problemas que afetam a qualidade da rede, bem como a causa do seu surgimento e o seu respetivo efeito nos aparelhos. Também é dada uma ligeira informação acerca das normas relativas à QEE.

Capítulo 1 - Introdução

No quinto capítulo, “Energia”, dá-se uma breve descrição da energia e a informação relativa ao modo de obtenção dos parâmetros, tanto para condições sinusoidais como para condições não sinusoidais. É feita uma breve introdução à série de Fourier.

No sexto capítulo, “Arquitetura do Sistema”, encontram-se todos os componentes que se integram no projeto, bem como todas as ferramentas necessárias para a realização do mesmo.

No sétimo capítulo, “Resultados”, encontram-se inseridos todos os testes realizados com diferentes tipos de cargas ao sistema.

Por fim, esta dissertação termina com o oitavo capítulo, “Conclusões e Trabalho futuro”, onde são apresentadas as conclusões e dadas breves ideias do que se pode fazer no futuro para complemento do trabalho.

2. CONTADORES

Neste capítulo será apresentada uma ligeira introdução aos contadores, bem como o tipo de contadores existentes na rede (contadores Eletromecânicos, Híbridos e Estáticos) e a sua respetiva distribuição em Portugal continental.

2.1 Introdução

O processo de medição, registo da energia consumida tem sofrido grandes alterações ao longo dos anos. Na maioria das habitações são usados os contadores de energia eletromecânicos.

Atualmente, já existem habitações com contadores digitais que indicam digitalmente o consumo, mas que necessitam de um cobrador para verificar pessoalmente o valor da contagem.

Os contadores eletromecânicos, que funcionam pelo princípio da indução magnética, foram os primeiros contadores a surgir no mercado para medição de energia elétrica. O primeiro contador deste género foi desenvolvido por *Ottó Bláthy*.

A corrente elétrica que circula no sistema percorre bobinas, as quais por sua vez induzem o movimento de um elemento girante, geralmente um disco, a uma velocidade proporcional à potência que é medida. [4]

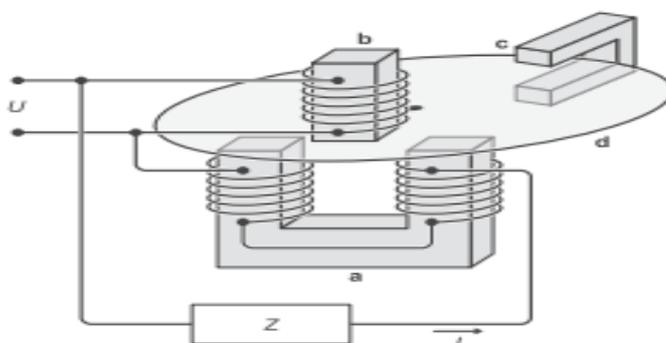


Figura 2-1 - Esquema do aparelho eletromecânico [4]

2.2 Contador Eletromecânico

Os contadores eletromecânicos permitem, através de um sistema mecânico, medir a quantidade de energia elétrica utilizada. O sistema é composto por duas bobinas, uma de tensão em paralelo com a carga e outra de corrente em série com a carga. É possível ver a sua disposição através da figura 2.1, onde a bobina de tensão é representada pelo componente b e a de corrente pelo componente a.

A corrente recebida pela carga atravessa a bobina de corrente, a qual, por sua vez, irá criar um campo magnético. O produto entre o campo magnético produzido pelos dois indutores determinará a magnitude das correntes Foucault induzidas no disco (d).

O fluxo gerado pela bobina de tensão irá induzir correntes de Foucault no disco. Estas vão depois interagir com o fluxo criado pela corrente que atravessa a bobina, localizada na parte inferior do disco, e a força resultante destas duas interações irá gerar um binário no disco proporcional à potência consumida pela carga naquele instante, fazendo-o girar. As rotações do disco acionam um sistema de engrenagens devidamente calibrado, sendo desta forma possível fazer a medição de potência por unidade de tempo. O elemento c da figura 2.1 representa um íman permanente, cuja função é provocar um atraso no disco. A interação entre os fluxos e a ação do íman fará com que o disco gire de forma proporcional à potência consumida.

Os campos magnéticos gerados estão dependentes das cargas utilizadas, na rede BT as cargas mais relevantes são as cargas resistivas e as indutivas.

Numa carga resistiva, a corrente que percorre a bobina de tensão (b) encontra-se desfasada 90° em relação à corrente que percorre a bobina de corrente (a). Analisando a figura 2.2, a intensidade máxima das correntes de Foucault geradas pelo campo magnético B_a ocorre nos tempos II e IV, da mesma forma que a intensidade máxima de corrente Foucault induzidas no disco pela bobina B_b ocorre nos tempos I e III. A intensidade máxima de correntes induzidas no disco coincide com o valor máximo do campo magnético gerado pela bobina contrária à que induziu.

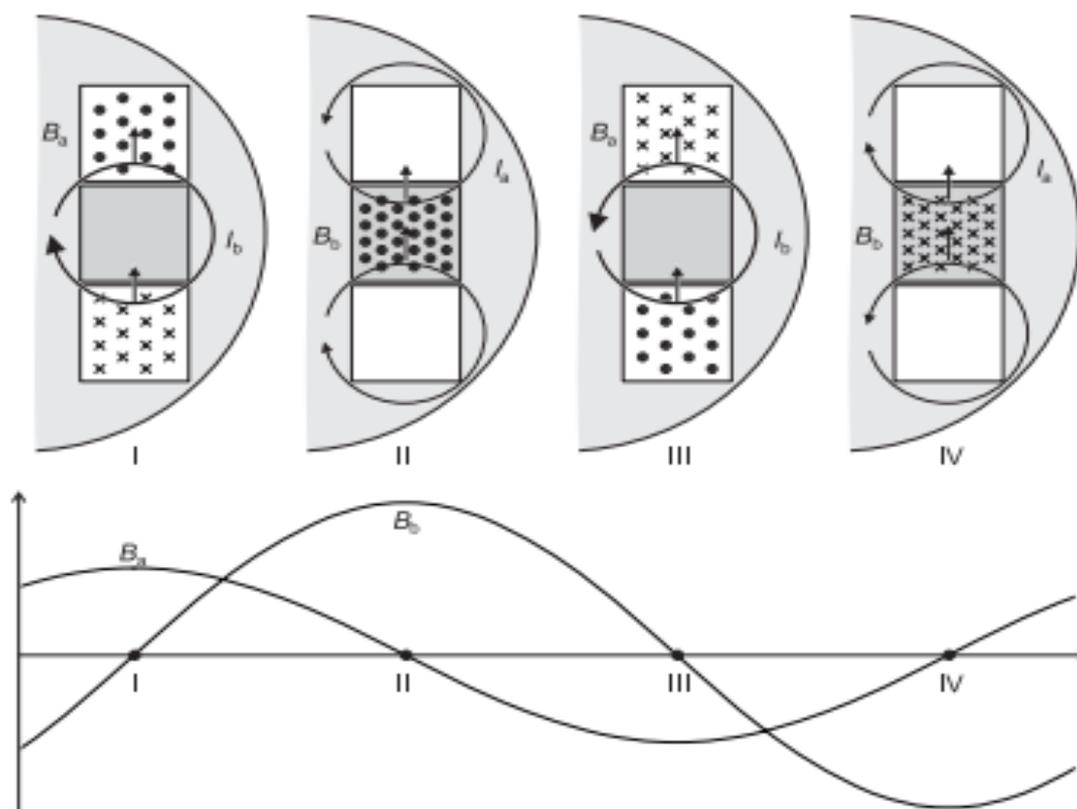


Figura 2-2 - Interação entre as correntes de Foucault e os campos magnéticos durante quatro períodos de tempo no caso de uma carga resistiva [4]

Uma carga puramente indutiva, causará um atraso adicional na corrente de 90° , fazendo com que os campos magnéticos gerados pelas duas bobinas estejam em fase. Como consequência, as forças que atuam no disco estão em equilíbrio. No CEM tal não acontece, porque, quando os fluxos magnéticos estão em fase, o ímã (c) induz um binário no disco (d), o que irá provocar um desequilíbrio nas forças atuantes no disco, fazendo com que este gire de forma proporcional à potência consumida. No entanto, os harmônicos de tensão e corrente geram, por sua vez, outros binários que influenciam o elemento girante, podendo agir contra ou a favor do movimento, provocando erros de leitura. Os erros de leitura resultam de vários fatores, tais como distorção de corrente, direção do fluxo de energia, entre outros. Os elementos magnéticos do contador que contêm fluxo magnético são não lineares relativamente à frequência e amplitude dos harmônicos e, como tal, os componentes de fluxo para calibração do instrumento alteram os seus valores. Porém, só ocorrem erros consideráveis nas medidas para grandes distorções de tensão e corrente (acima de 20%). [5]



Figura 2-3 - Contador Eletromecânico da Reguladora

2.3 Contador Híbrido

Quanto ao Contador Híbrido, este usa os mesmos instrumentos eletrônicos para obter a contagem da energia que os contadores eletromecânicos. O seu princípio de funcionamento é igual ao contador eletromecânico com a diferença que estes contadores híbridos apresentam um *Display* que indica o valor da energia consumida e as horas.

Por não ser muito diferente nem possuir muitas vantagens em relação ao contador eletromecânico, o contador Híbrido não é muito utilizado.



Figura 2-4 - Contador Híbrido da JANZ [6]

2.4 Contador Estático

O Contador Estático é a “nova” geração de contadores de energia. Estes são considerados os dispositivos de contagem do futuro e vêm substituir os contadores eletromecânicos.

Nos contadores estáticos, as grandezas analógicas de corrente e tensão são inicialmente lidos por sensores e depois transformadas em grandezas digitais. Este tipo de contadores apresenta uma melhoria significativa na leitura das medições da energia elétrica em relação aos contadores eletromecânicos, dado que são menos suscetíveis a erros de medida.

Este dispositivo possui um *Display* que indica em tempo real o consumo da energia e o custo da mesma.

O CE é capaz de estabelecer uma ligação entre o próprio contador e as centrais de dados, logo a companhia que fornece energia terá sempre um valor atualizado da energia a ser consumida pelo estabelecimento onde o contador está alocado, não sendo necessário o deslocamento de um indivíduo da empresa reguladora para obter o registo do mesmo.

Por ser um dispositivo digital, o consumidor final pode ter acesso à informação fornecida pelo contador através da empresa reguladora (*Internet*) ou via *Wireless*, ou seja, o dispositivo pode ser capaz de enviar a informação para qualquer dispositivo digital, por exemplo um *Smartphone*.

A implementação de contadores estáticos na rede tem benefícios, tais como:

- Custos acertados – evitam que o consumidor final pague mais do que a energia que consumiu;
- Deslocamento de funcionário – não terá de se deslocar à residência para obter as leituras do contador;
- Acesso a informação – tanto o consumidor final como o fornecedor tem acesso à informação lida em tempo-real.

A desvantagem que advém do uso dos contadores estáticos é o facto de estes consumirem energia da rede para o seu funcionamento.



Figura 2-5 - Contador Estático da JANZ

2.5 Evolução e distribuição dos contadores em Portugal Continental

A EDP Distribuição tem cerca 6 121 250 contadores instalados em clientes de baixa tensão (BT).

Este número inclui contadores eletromecânicos, contadores híbridos e contadores estáticos. A distribuição pelos diferentes tipos de contadores é a seguinte:

- Contadores eletromecânicos: 4 418 969;
- Contadores híbridos: 334 680;
- Contadores estáticos: 1 367 601.

As características e funcionalidades dos contadores instalados em Portugal Continental, podem ser vistos na tabela 2.1.

Tabela 2-1 - Características e funcionalidades (EDP - D)

Tipo	Características	Funcionalidades
Eletromecânicos	Medição de energia ativa Classe de precisão 2	
Híbridos	Medição de energia ativa Classe de precisão 2	Multi-tarifa Relógio integrado
Estáticos	Medição de energia ativa/reactiva Classe de precisão MID-A ou MID-B <i>Display</i> Disponibilização Porta- Série	Multi-tarifa Relógio integrado Registos históricos Potência Máxima Eventos

O parque de contadores instalados é aproximadamente 70% monofásico e 30% trifásico.

[7]

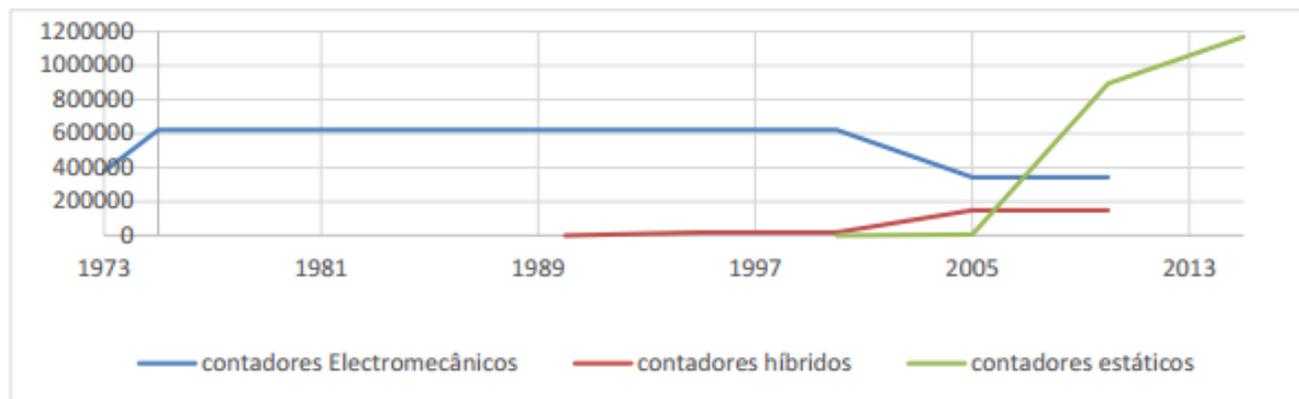


Figura 2-6 - Distribuição do número de contadores instalados pela EDP-D [7]

A implementação dos contadores no sector doméstico tem sofrido algumas evoluções ao longo do tempo.

Através da análise da figura 2.7, é possível perceber que as tecnologias no ramo da contagem de energia estão em constante desenvolvimento. Os CEM caíram em desuso desde 2005, esta tecnologia ainda se mantém desde meados da década de 90 devido à perspetiva de generalização do uso de contadores inteligentes. [8]

Evolução das diferentes tecnologias de contadores no segmento de doméstico

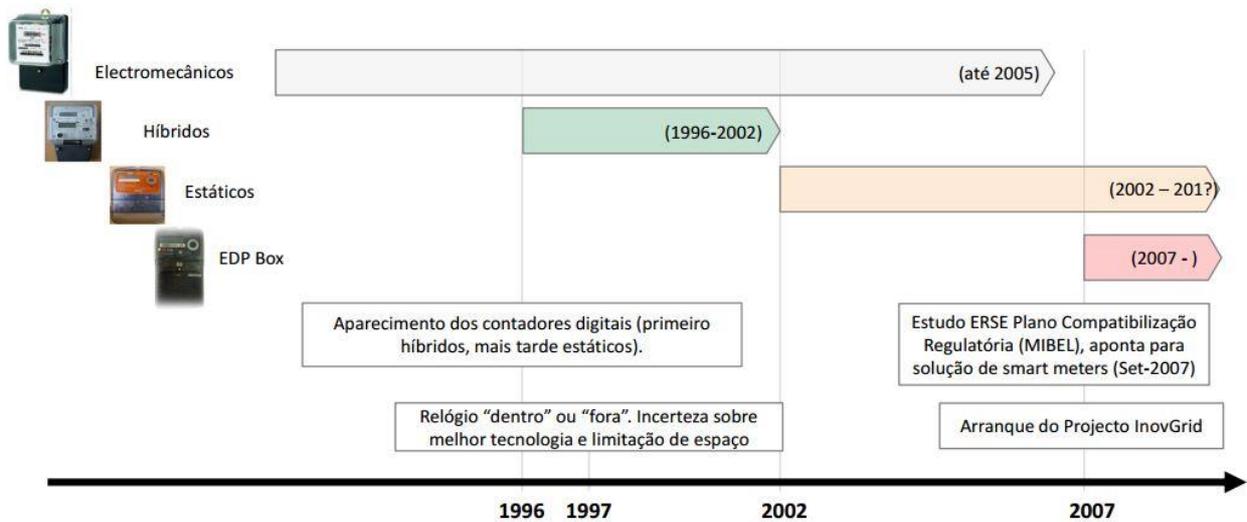


Figura 2-7 - Evolução dos contadores no sector doméstico [8]

O rumo tem sido sempre melhorar e aperfeiçoar as leituras medidas. Mais recentemente, apareceram as “EDP Box” que estão a ser usadas em projetos das redes inteligentes por parte da EDP em Évora e em Guimarães.

3. SMARTGRID

Este capítulo descreve em que consiste uma rede inteligente, as suas vantagens e o objetivo do uso das mesmas. Também será apresentado um projeto-piloto inserido em Portugal, bem como uma descrição dos medidores aí utilizados.

3.1 Introdução

A *SmartGrid* consiste numa rede elétrica inteligente para gestão e distribuição de energia. É utilizada uma tecnologia de informação e comunicação para reunir a informação da rede e agir sobre esta. Isto significa que estas redes são automatizadas com medidores de qualidade e de consumo de energia que operam em tempo real e podem fornecer informações sobre o comportamento dos fornecedores e dos consumidores para melhorar a eficiência, economia e sustentabilidade da produção e distribuição de eletricidade. [9]

As redes inteligentes procuram responder às necessidades do utilizador, permitindo o aumento do interesse em oportunidades do mercado de energia elétrica, conduzindo a preços mais baixos. Com uma maior monitorização da rede, torna-se também possível uma gestão mais eficiente e controlada da energia, procurando aumentar a sua qualidade.

Este sistema assenta em sete princípios básicos: (i) Autorreparo em situações de perturbação de energia; (ii) Opera contra ataques físicos e cibernéticos; (iii) Possibilita uma participação ativa dos consumidores; (iv) Gera novos produtos, serviços e mercados; (v) Possibilita a incorporação de todas as opções de geração e armazenamento de energia; (vi) Otimiza os recursos e opera eficientemente; (vii) Fornece uma qualidade de energia elétrica segundo padrões atuais.

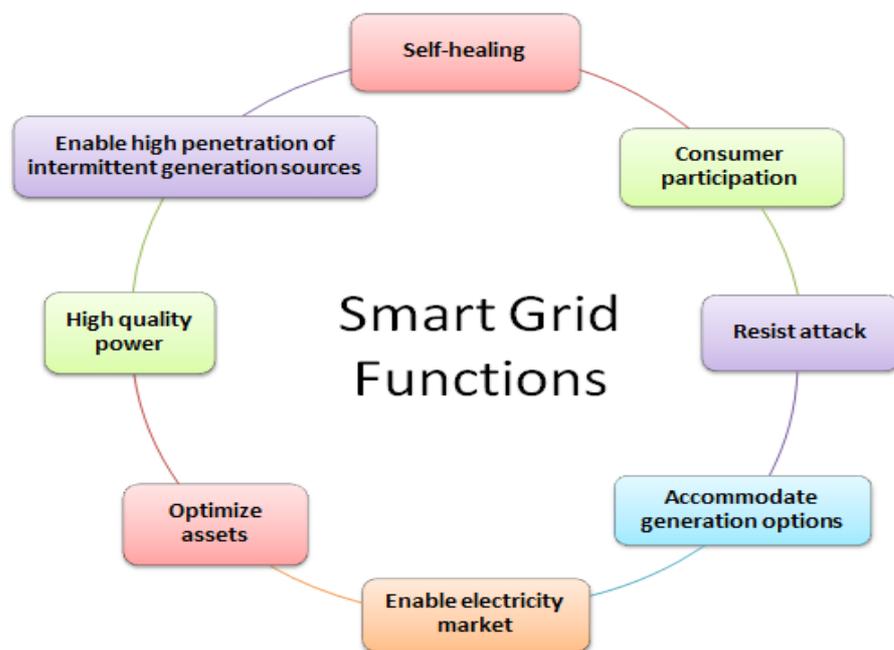


Figura 3-1 - Funções da Rede Inteligente [10]

A *SmartGrid* possui vantagens como: (i) Reduzir os picos de consumo de energia, através da gestão do consumo do cliente. (e.g. programar o uso de máquinas de lavar para horas onde o consumo é mais baixo); (ii) Aplicações de tecnologia mais limpa (e.g. carros elétricos, uso de energia solar e eólica); (iii) Aumento da eficiência operacional do sistema (utilização de sensores para detetar, diagnosticar e corrigir problemas); (iv) Aumentar a fiabilidade, eficiência e qualidade da energia.



Figura 3-2 - Modelo de uma Rede Inteligente [11]

3.2 InovGrid

O InovGrid é um projeto inovador que visa dotar a rede elétrica de informação e de equipamentos capazes de automatizar a gestão das redes. Este foi anunciado em 2007 com o intuito de melhorar a rede de distribuição: reduzir custos de operação; melhorar a qualidade de serviço; promover a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental; potenciar a penetração das energias renováveis e do veículo elétrico. [7] [12] [13]

O foco do Projeto InovGrid centra-se no conceito das redes inteligentes, com impacto direto ao nível da rede de distribuição, na qual se pretende reforçar os ativos de gestão remota inteligente, dotando a mesma de capacidade de geração dispersa. Sendo o sistema dotado de uma distribuição inteligente (centrado na telegestão de energia) há uma interação da rede entre consumidores/produtores. [14]

O InovGrid ambiciona substituir os atuais contadores CEM por dispositivos chamados *Energy Box*. Estas EB encontram-se integradas numa rede que se pretende dotada de automação, com dispositivos de armazenamento e processamento de informação/comando e controlo a nível dos postos de transformação (PT) de média para baixa tensão que poderão comandar algumas funcionalidades das EB através de soluções de tecnologias e sistemas de informação, agregando informação e providenciando novos serviços para os consumidores. [7]

O InovGrid encontra-se implementado em Évora. Os seus objetivos assentam em: (i) Equipar a rede elétrica com dispositivos de informação; (ii) Reduzir as perdas de energia elétrica, devido a uma gestão melhorada da rede BT; (iii) Automatizar a gestão da rede; (iv) Melhorar a qualidade de serviço, fornecendo ao consumidor mais e melhor informação; (v) Reduzir os custos de operação e melhorar operações técnicas; (vi) Promover a eficiência energética e a sustentabilidade ambiental; (vii) Aumentar a preponderância das energias renováveis (micro-geração) e veículos elétricos nas redes elétricas.

A InovGrid possui vários benefícios em amplas áreas:

- Redes de distribuição mais inteligentes: Possibilita controlar e gerir ao instante o estado de toda a rede de distribuição elétrica; Permite que os comercializadores e empresas de serviços energéticos disponibilizem, sobre esta plataforma tecnológica, informação, produtos e serviços energéticos de valor acrescentado para os consumidores;

- **Empresas eficientes:** Fornece ferramentas inovadoras que permitem um controlo detalhado e viável dos seus consumos de energia; As empresas podem ajustar o consumo energético à sua atividade, o que pode resultar em níveis de eficiência superiores e na redução dos custos;
- **Habitações mais inteligentes:** O consumidor pode conhecer os seus consumos ao longo do dia, sabendo exatamente onde e como gasta a energia; O consumidor conhece as horas do dia em que mais consome e aquelas em que pode usar a eletricidade a um preço mais favorável, passando a conseguir programar os seus eletrodomésticos para funcionar nesses períodos; O consumidor torna-se produtor e vendedor de energia; Em caso de necessidade, a produção de uma casa ou de um conjunto de vizinhos pode assegurar o fornecimento de eletricidade a várias outras casas ou até a todo o bairro; Se o morador possuir um veículo elétrico, pode calcular a parcela exata de consumo alocada ao seu abastecimento na sua habitação, uma vez que terá a capacidade de medir o consumo de energia de 15 em 15 minutos; O comercializador poderá oferecer serviços e planos de preços permanentemente adaptados ao perfil e necessidades de consumo;
- **Microprodução:** A rede inteligente de energia vai potenciar o volume de energia que qualquer utilizador desta rede inteligente pode produzir em sua casa; O consumidor torna-se produtor e vendedor de energia e vai poder instalar mais facilmente painéis solares fotovoltaicos ou pequenas turbinas eólicas em sua casa, assim como vender energia à rede, se assim o desejar; A gestão energética torna-se mais eficiente, dado que o balanço energético entre o que consome e o que produz, vai poder ser consultado *Online*, via *Web*, percebendo-se exatamente a que hora do dia é consumidor e a que hora é produtor;
- **Mobilidade elétrica:** A rede inteligente será suporte das operações de carga e descarga dos veículos elétricos. Estas operações servirão para receber energia da rede elétrica, quando a mesma está disponível e tem preço mais baixo, ou para restituir a energia à rede quando esta é mais necessária e a um preço que se traduza em rentabilidade acrescida para o utilizador; A rede inteligente possibilita um controlo quase em tempo real da energia consumida nestes postos de abastecimento, o que permitirá ao

consumidor calcular a parcela de consumo alocada ao veículo elétrico abastecido na sua habitação;

- Iluminação pública: As luminárias tradicionais podem ser substituídas por luminárias de tecnologia LED, esta alteração reduz 40% a 50% do consumo de eletricidade; Também é feito o controlo da iluminação em função das necessidades e condições naturais de luminosidade – com o entardecer, a iluminação ativa-se e, progressivamente, aumenta a sua intensidade com a diminuição da luz solar, evitando assim consumos desnecessários, diminuição da intensidade luminosa, nas horas mortas (2:00 e as 5:00) mas mantendo as condições mínimas de segurança; Adoção de sistemas de controlo dinâmicos, que fazem a gestão do fluxo luminoso em função da presença rodoviária ou humana.

A InovGrid está a ser desenvolvida pelo Operador da Rede de Distribuição (ORD), EDP-D e com o apoio de parceiros nacionais e internacionais de produção industrial, de tecnologia e de investigação: EDP Inovação, o INESC Porto, EFACEC, a LOGICA e a JANZ/CONTAR. [12]



Figura 3-3 - Parceiros do Projeto InovGrid [15]

3.3 EDP BOX

A *Energy Box* é um dispositivo de gestão da energia, aplicado na instalação elétrica do cliente e no conceito das redes inteligentes. É o último nó da rede perto do cliente e possui como funções o controlo das cargas e controlo da micro-geração.

O conceito da EB é possuir a capacidade de ser mais do que um aparelho de medição, por ser capaz de fornecer informações técnicas para uma melhor gestão da rede. São configuradas com o objetivo da gestão do domicílio, implementação de processos de sustentabilidade e uso inteligente da energia. [16]

A integração das EB na rede permite não só a receção de um alarme, no caso da existência de uma anomalia na rede (BT), mas também contem a capacidade de permitir que o cliente identifique essa falha sem que seja necessário o envio de uma equipa técnica ao local do problema. [7]



Figura 3-4 - *Energy Box* usado no projeto InovGrid [7]

A EB consegue medir a energia reativa (capacitiva ou indutiva) e a energia ativa (consumida ou produzida pela rede BT) tornando assim possível a gestão da micro-geração com um só equipamento de medida.

As EB podem ser acedidas remotamente, sendo o equipamento concebido para incluir um módulo de comunicação. Este modulo usa o protocolo de comunicação PLC (*Power Line Communication*) e estabelece uma comunicação bidirecional com o DTC (*Distribution Transformer Controller*).

A razão principal para a integração da comunicação na EB é permitir o complemento de tecnologias de comunicação como GPRS (*General Packet Radio Services*), RF Mesh ou outro tipo de tecnologias de comunicação. [16] [17]

4. QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Este capítulo refere-se aos problemas de QEE que se podem encontrar na rede elétrica. Também é dada uma breve indicação de uma norma utilizada na Europa para gestão e manuseamento das redes.

4.1 Introdução

Tendo em conta a crescente perceção e mediatização em torno do problema da qualidade de energia elétrica e o seu potencial impacto na competitividade das Empresas, é importante discutir os problemas conhecidos até ao momento, desafios para o futuro e as formas de resolver os obstáculos do presente.

A qualidade de energia elétrica refere-se à performance e à estabilidade do fornecimento de energia, quando comparado com os padrões do fornecedor e com as necessidades dos consumidores.

Os fatores que estão, neste momento, a contribuir para a crescente importância neste tópico são:

- A consciência dos riscos que estes problemas trazem para os sistemas de energia e o conhecimento cada vez maior sobre os seus fenómenos obriga as companhias a melhorar a sua qualidade de serviço;
- Garantir que todos os recursos investidos, por uma empresa, sejam rentabilizados da melhor forma possível;
- Os prejuízos económicos resultantes dos problemas de QEE nas indústrias;
- Desenvolvimento verificado nos últimos anos em áreas como eletrónica de potência e sistemas embebidos. Os novos dispositivos, baseados em microprocessadores, são cada vez mais sensíveis a problemas de variação de qualidade de energia em relação ao equipamento antes utilizado.

Para melhor entender o que é um problema de QEE, o *International Electrotechnical Comission* define-o como sendo qualquer perturbação que provoque uma alteração no sistema, normalmente ocorrida depois de uma alteração temporária forçada no sistema. (Anexos I e II)

Estes problemas são normalmente categorizados de acordo com a sua magnitude e duração, podendo estes ser subtensões, sobretensões, interrupções momentâneas, transitórios,

flutuações de tensão, ruído e distorção harmônica. Irá agora ser feita uma breve descrição sobre cada um destes problemas.

4.2 Subtensão Momentânea

Um cava de tensão consiste normalmente numa redução do valor eficaz da tensão entre 10% a 90% (0,1 e 0,9 pu) com uma duração de meio ciclo até a um máximo de alguns segundos. [18]

As causas que originam este fenómeno estão normalmente associadas com o arranque de grandes cargas (ex. motores), descargas atmosféricas ou simplesmente com a existência de correntes de curto-circuito na rede elétrica. [19]

As possíveis consequências deste fenómeno são: (i) Incorreta operação de aparelhos de controlo; (ii) Variação de velocidade nos motores elétricos; (iii) Disparo indevido de disjuntores.

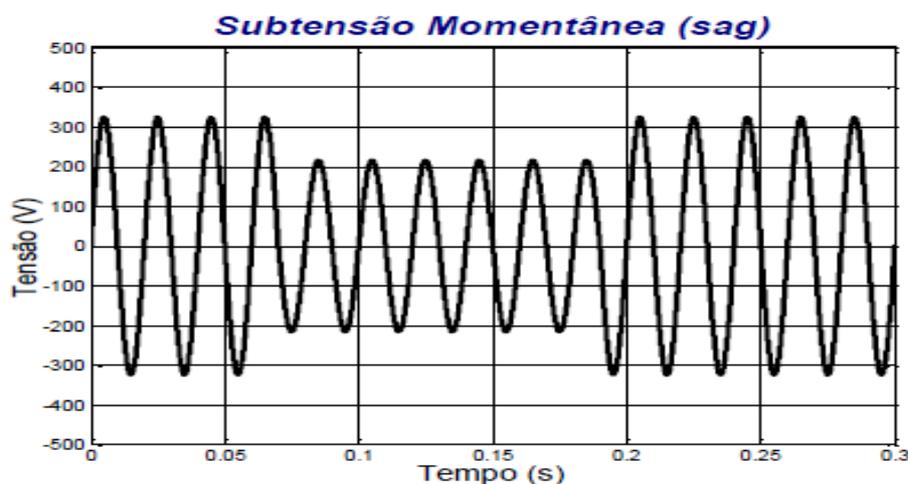


Figura 4-1 - Subtensão Momentânea (SAG) [20]

4.3 Sobretensão Momentânea

Uma sobretensão consiste num aumento entre 1,1 e 1,8 pu do valor eficaz da tensão ou corrente com uma duração de no mínimo meio ciclo até 1min. O termo classificado pelo IEC-Swell está relacionado com sobretensões e sobreintensidades, ambos classificados da mesma forma no que toca a magnitude e duração. [21] [18]

Num sistema trifásico, as sobretensões aparecem nas fases onde a falha não ocorreu (do tipo fase-terra), podem ocorrer também após uma desconexão de banco de condensadores ou após uma interrupção de fornecimento de energia a cargas seletivas para manter a frequência do sistema no valor nominal. Isto ocorre quando a potência gerada não vai ao encontro das necessidades da carga. [18]

Este fenômeno pode ter consequências como: (i) Afetar a operação normal dos aparelhos de controle; (ii) Encurtar a vida a equipamentos sensíveis.

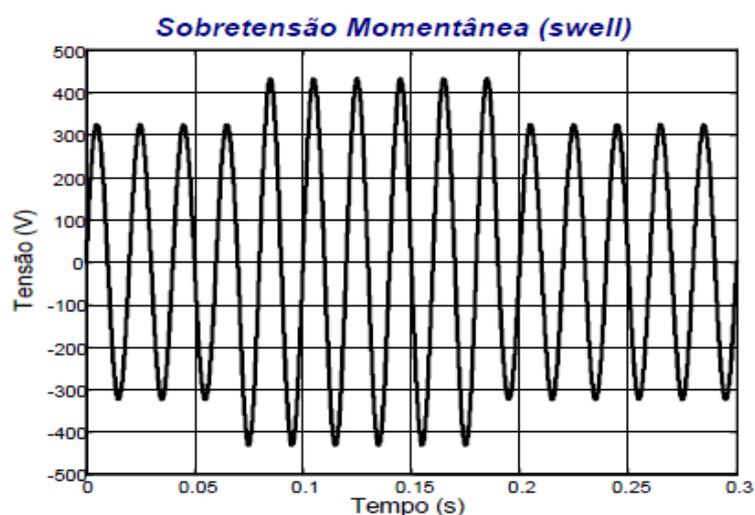


Figura 4-2 - Sobretensão Momentânea (SWELL) [20]

4.4 Interrupção Momentânea

Uma interrupção momentânea existe quando a tensão nominal ou corrente de carga é inferior a 0,1pu. Quanto à sua duração, terá de ser obrigatoriamente inferior a 1 minuto, caso contrário pode considerar-se uma falha total do sistema.

As interrupções momentâneas ocorrem como resposta do sistema elétrico a uma falha e, dependendo da sua duração, é possível determinar como o sistema está a responder. Por exemplo, na ocorrência de uma falha, caso esta esteja extinta ao fim de 30 ciclos, pode-se concluir que os disjuntores atuaram, fazendo com que a falha se extinga e, depois da sua atuação, os disjuntores fecham-se automaticamente. [18] [19]

As possíveis consequências deste fenómeno são: (i) Parar a produção numa fábrica; (ii) Afetar aparelhos de controlo.

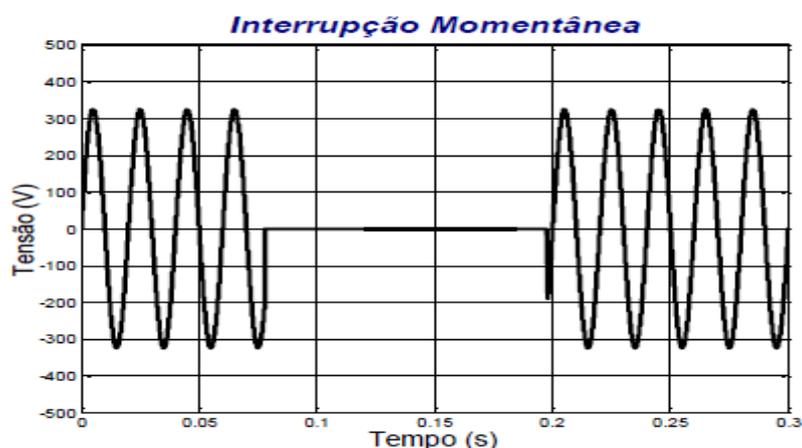


Figura 4-3 - Interrupção Momentânea [20]

4.5 Transitórios

Os Transitórios estão normalmente associados a mudanças repentinas e de curta duração no sistema.

Os eventos causadores de transitórios são: (i) Arranque ou paragem de processos de energização de componentes da rede em larga escala (bancos de compensação, linhas de transmissão, transformadores, rejeição de cargas, entre outros); (ii) Abertura e fecho de disjuntores na rede. [22]

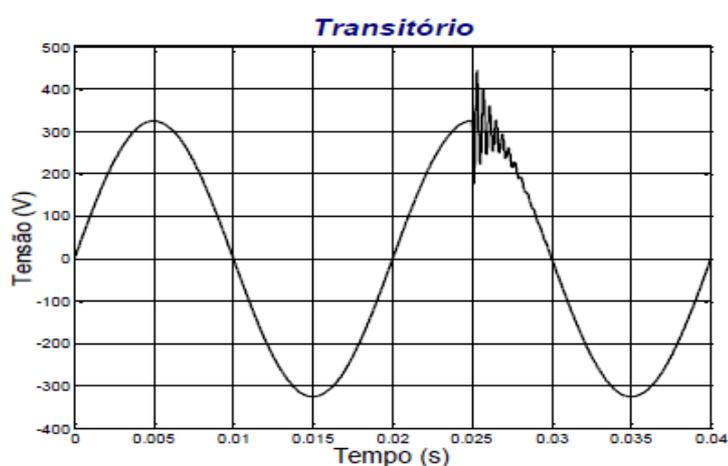


Figura 4-4 - Transitório [20]

Alguns autores distinguem os transitórios de duas formas, impulsivo e oscilatório.

O transitório impulsivo é caracterizado por possuir uma subida de pico em $1,2\mu\text{s}$ e a sua descida para metade do seu pico em $50\mu\text{s}$. Devido às suas características, este tipo de transitórios não é normalmente conduzido do local da ocorrência da perturbação. Pode, no entanto, alterar a frequência natural do circuito e criar novos transitórios oscilatórios. A origem mais comum para o aparecimento de transitório impulsivo são as descargas atmosféricas. (Anexo III)

Quanto aos transitórios oscilatórios, é efetuada também uma divisão dos mesmos, isto de acordo com a frequência da sua componente fundamental. Se esta for superior a 500kHz , são classificados como sendo de alta frequência e ocorrem, normalmente, como resposta a um oscilatório impulsivo. Entre 5 e 500kHz são considerados de média frequência. Por último, se a componente fundamental for inferior a 5kHz e a duração entre $0,3$ e 50ms , são transitórios oscilatórios de baixa frequência.

Para valores entre 300 Hz e 900 Hz está normalmente associado o arranque de compensadores, e com valores inferiores a 300 Hz podem surgir fenómenos como o de ferro-ressonância: tipo de ressonância irregular que surge devido às características não lineares da indutância do núcleo de um transformador com a capacitância da rede. [18]

4.6 Flutuações de Tensão (*Flicker*)

As flutuações de tensão podem ser definidas como variações aleatórias e repetitivas na magnitude de tensão, normalmente estes não excedem $0,9$ a $1,1\text{pu}$. (ANSI C84.1)

Este tipo de perturbações está normalmente associado a cargas que não exigem uma potência constante ao longo do tempo. O arranque de motores de elevada potência, variações de certas cargas e o arranque de banco de condensadores para correção do fator de potência contribuem para a propagação deste efeito.

Este efeito traduz-se, normalmente, na oscilação da intensidade de iluminação elétrica perceptível ao olho humano.

A sua análise é feita através da avaliação do valor eficaz da tensão, da sua estabilidade e continuidade. A avaliação é feita através de três formas: índices de flutuação de tensão, o Pst e o Plt, dois termos utilizados para medir a circunspeção do *flicker* a curto e longo termo, respetivamente.

A primeira forma descreve a variação do valor eficaz da tensão através da amplitude e frequência da tensão. Os outros dois servem para a avaliação da intensidade do *flicker*. [18]

Quanto às consequências desta perturbação na QEE:

- Nos transformadores existe a magnetostricção, propriedade dos materiais ferromagnéticos que faz com que estes alterem as suas dimensões e tamanho conforme o campo magnético aplicado, o que leva a que, caso a distorção seja muito elevada, e a vibração suficiente alta, os materiais de isolamento sejam severamente afetados, bem como fenômenos de ressonância mecânica;
- No que toca a motores elétricos, podem verificar-se variações de binário e velocidade, vibrações transferidas para a carga e para os suportes da máquina, entre outros;
- Irritação causada nos seres Humanos devido à variação da intensidade luminosa.

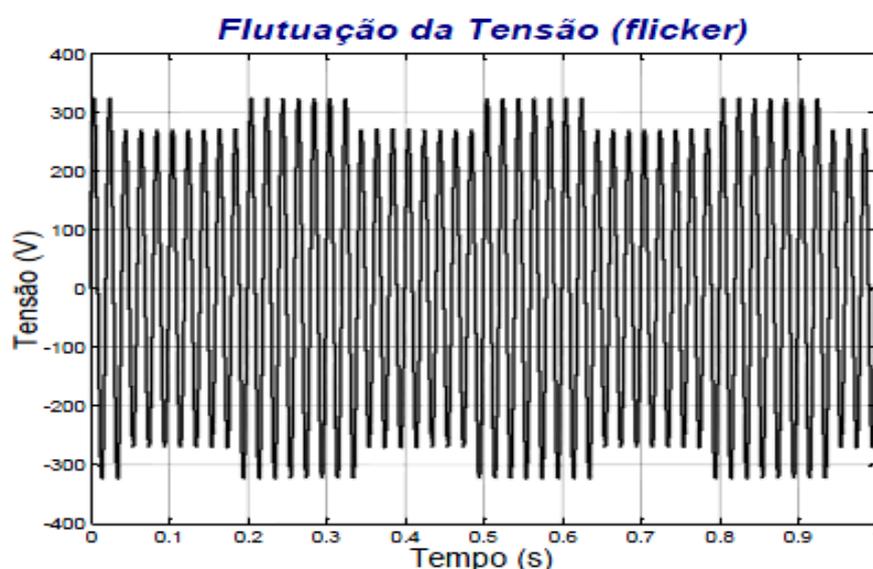


Figura 4-5 - Flutuação de Tensão [20]

4.7 Micro cortes de Tensão (*Notches*)

Esta perturbação é causada pela operação dos semicondutores de potência aquando da comutação da corrente entre fases. Trata-se de um problema de QEE periódico, que resulta dos curto-circuitos momentâneos entre fases.

No instante em que o *Notch* ocorre, a tensão tende a aproximar-se de 0, estando esta limitada pelas impedâncias do sistema. Por norma, as componentes associadas a esta perturbação são bastante elevadas, sendo que, por esta razão, este fenómeno é tratado de uma forma diferente dos restantes. Para ser corretamente caracterizado necessita de equipamento especializado para este fenómeno e não equipamento para medição de harmônicos regular.

[18]

Quanto às consequências deste fenómeno: (i) Causar danos em bancos de compensação; (ii) Interferência rádio; (iii) Mau funcionamento de aparelhos elétricos.

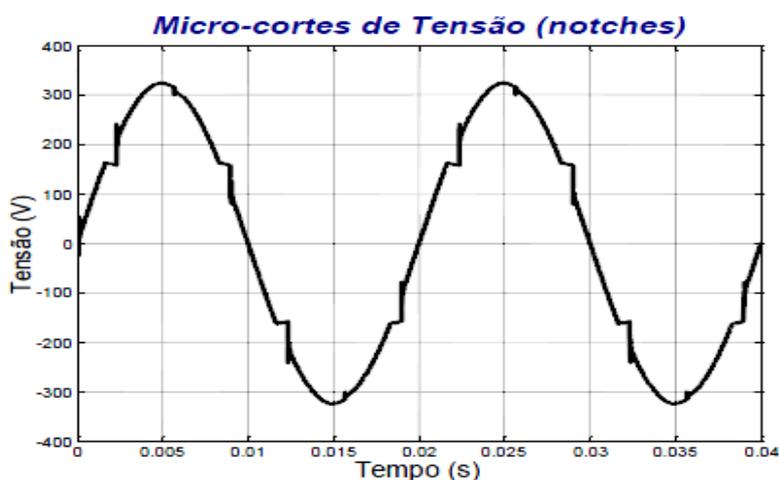


Figura 4-6 - Micro cortes de Tensão (Notches) [20]

4.8 Ruído

Corresponde ao ruído eletromagnético de alta frequência, normalmente encontrado nos condutores neutros ou nas linhas de sinal.

Pode ser causado por dispositivos eletrônicos de potência, como circuitos de controle, equipamentos de arco, retificadores e fontes comutadas. [22]

Este fenómeno causa distúrbios em microcomputadores e em controladores programáveis, ou seja, afeta elementos de controle.

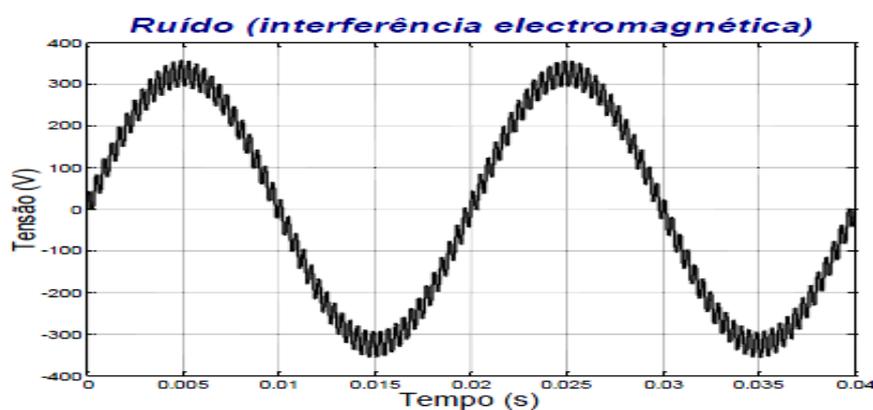


Figura 4-7 - Ruído (Interferência eletromagnética) [20]

4.9 Harmônicos

O problema referente aos harmônicos é um dos mais sonantes de QEE, e os seus efeitos, em todo o tipo de equipamentos e constituintes de um sistema elétrico, têm vindo a ser alvo de diversos estudos e investigações.

Os harmônicos são tensões ou correntes sinusoidais com frequências que são múltiplos, ou não, da frequência fundamental do sistema.

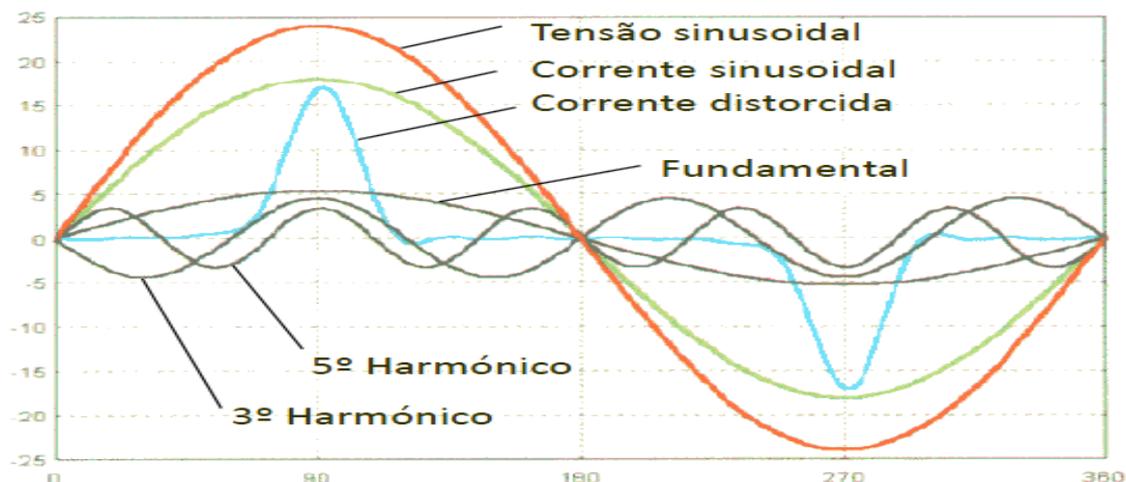


Figura 4-8 - Exemplo da forma de onda distorcida e a sua decomposição [20]

No caso de não serem múltiplos da frequência fundamental são considerados de Inter-harmônicos. A sua origem advém do uso de cargas não lineares, ciclo-conversores, fornos de indução e cargas que operem com arco elétrico. [23] [18]

O nível de distorção harmónica pode ser observado a partir da análise espectral, a partir das magnitudes de cada harmónico. O *Total Harmonic Distortion* é o índice utilizado para analisar o valor eficaz da distorção harmónica.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \quad (4.1)$$

Porém, este índice não é usado isoladamente, pois em algumas situações, ainda que a distorção seja baixa, pode ser alta em termos relativos. Assim, surgiu um novo termo, o IEEE Standard 519-1992 define-o como *Total Demand Distortion* (TDD), que já analisa o THD relativamente a um valor nominal de corrente ou tensão, em conformidade com o caso a ser analisado. [18]

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_L} \quad (4.2)$$

A existência de harmônicos na rede pode trazer efeitos como: (i) Problemas de ressonância; (ii) Saturação; (iii) Redução da vida útil dos equipamentos; (iv) Mau funcionamento de transformadores, banco de condensadores e máquinas elétricas; (v) Interferência eletromagnética em equipamentos de comunicação; (vi) Atuação indevida de aparelhos de proteção. (Anexo IV)

Inter - Harmônicos

Os Inter-harmônicos são tensões ou correntes cuja frequência não é múltipla da frequência fundamental.

As principais causas do aparecimento de Inter-harmônicos no sistema podem ser: (i) Conversores estáticos; (ii) Ciclo-conversores; (iii) Motores de indução; (iv) Computadores; (v) Equipamentos de arco.

Os Inter-harmônicos causam problemas como flutuações de tensão, redução do binário, aumento da temperatura nas máquinas de indução e mau funcionamento de sistemas de proteção. [22] O fator que define os inter-harmônicos é o seguinte:

$$TIHD = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^n (I^{(k)})^2}}{I^{(1)}} \quad (4.3)$$

k é o numero total de Inter – harmônicos

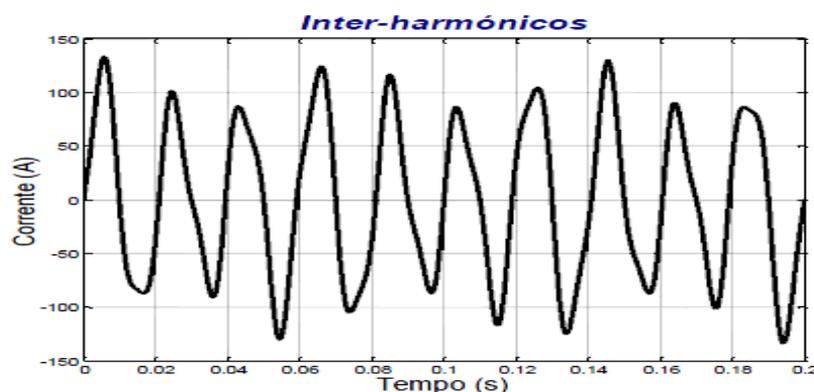


Figura 4-9 - Inter-harmônicos [20]

4.10 Normalização da Qualidade da Energia Elétrica

O controlo da qualidade de energia entregue aos consumidores tem vindo a ser discutido por diferentes organizações e institutos. Os documentos elaborados por estas entidades assentam em três níveis de aplicabilidade:

- Guias de Qualidade de Energia – são ilustrações e exemplos de procedimentos típicos que contêm parâmetros e representações de soluções para os problemas de qualidade de energia;
- Práticas recomendadas na Qualidade de Energia - É o reconhecimento da existência de várias soluções para a mitigação de problemas de QEE e recomendação de certas soluções em vez de outras;
- Padrão da Qualidade de Energia – Representam acordos formais entre as indústrias, consumidores e o governo de como proceder corretamente para a geração, teste, medida e consumo da energia elétrica. [22]

Os documentos mais adotados pertencem: (i) aos padrões Americanos, sendo estes, IEEE, ANSI e CEA; (ii) BS; (iii) EN; (iv) IEC; (v) CBEMA; (vi) ITIC; (vii) VDE; (viii) NEMA. [22] (Anexo V)

Das muitas normas existentes irá ser destacada a série IEC 61000, nomeadamente, os padrões relativos aos limites dos harmônicos. Esta encontra-se dividida em seis partes distintas:

- Primeira parte “Geral”: Estes padrões lidam com considerações gerais como componentes introdutivos, princípios fundamentais, definições e terminologias. A sua designação é IEC 61000-1-x;
- Segunda parte “Espaço/ Rede”: Estes definem as características do espaço onde os equipamentos irão ser aplicados, a classificação desse mesmo espaço e os seus níveis de compatibilidade. IEC 61000-2-x;
- Terceira parte “Limites”: Consiste na definição dos níveis de emissões que podem ser gerados pelo equipamento conectado na rede. Delimitam o valor numérico e também a imunidade dessas mesmas emissões. IEC 61000-3-x;
- Quarta parte “Teste e técnicas de medida”: este capítulo providencia um guia detalhado para os aparelhos de medida, bem como os procedimentos para fazer os testes, de acordo com as regras descritas nas restantes normas. IEC 61000-4-x;

- Quinta parte “Guias de instalação e Mitigação”: providencia um guia detalhado para a aplicação de equipamentos no sistema, como colocação da Terra e sistemas eletrônicos para assegurar compatibilidade eletromagnética. IEC 61000-5-x;
- Sexta parte “Diversos Assuntos”: Estas normas são regras genéricas que definem imunidade e níveis de emissão requeridos para os equipamentos. IEC 61000-6-x. [18]

Enquanto os padrões internacionais são usados como base para uma coorganização global, alguns países fazem os seus próprios ajustes para acomodar às necessidades do seu próprio sistema [24]. Para os fornecedores de energia elétrica esta norma é meramente indicativa, pelo que não sofrem qualquer consequência se a mesma não for cumprida.

Quanto à distorção harmónica, de acordo com a norma IEC 6100-2-2, os valores de THD máximo têm de ser sempre inferiores a 8% e os limites para os harmónicos indicados na seguinte tabela 4.1.

Tabela 4-1 - Níveis de compatibilidade para diferentes harmónicos de tensão numa rede BT [25]

Odd harmonics Non-multiple of 3		Odd harmonics Multiple of 3		Even harmonics	
Harmonic Order h	Harmonic Voltage %	Harmonic Order h	Harmonic Voltage %	Harmonic Order h	Harmonic Voltage %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
$17 \leq h \leq 49$	$2,27 \times (17/h) - 0,27$	$21 < h \leq 45$	0,2	$10 \leq h \leq 50$	$0,25 \times (10/h) + 0,25$

5. ENERGIA

A eletricidade é uma fonte de energia conveniente para ser transportada, a sua distribuição é feita em CA e os equipamentos usados para a sua transformação são eficientes. Este capítulo aborda uma pequena introdução à energia, à potência (condições Sinusoidais e não sinusoidais) e à série de *Fourier*.

5.1 Introdução

A Energia pode assumir diferentes formas, embora não se crie nem se destrua, alguns exemplos dessas formas são as energias elétrica, térmica, química, potencial entre outros. [26] [30]

A energia elétrica é uma importante fonte de energia e suporta quase todas as tecnologias. Esta está associada a fenómenos onde se encontram envolvidas cargas elétricas. A EE é produzida, transportada e distribuída sob a forma de corrente alternada. Por motivos de segurança, a energia é fornecida em BT (230V em Portugal). Esta alteração do valor da tensão varia ao longo da rede e é feita através da utilização de postos de transformação. O princípio de funcionamento dos transformadores exige a utilização de corrente alternada visto que os transformadores e muitos outros equipamentos baseiam-se em fenómenos de indução sendo que estes só se manifestam em campos eletromagnéticos variáveis no tempo. [27]

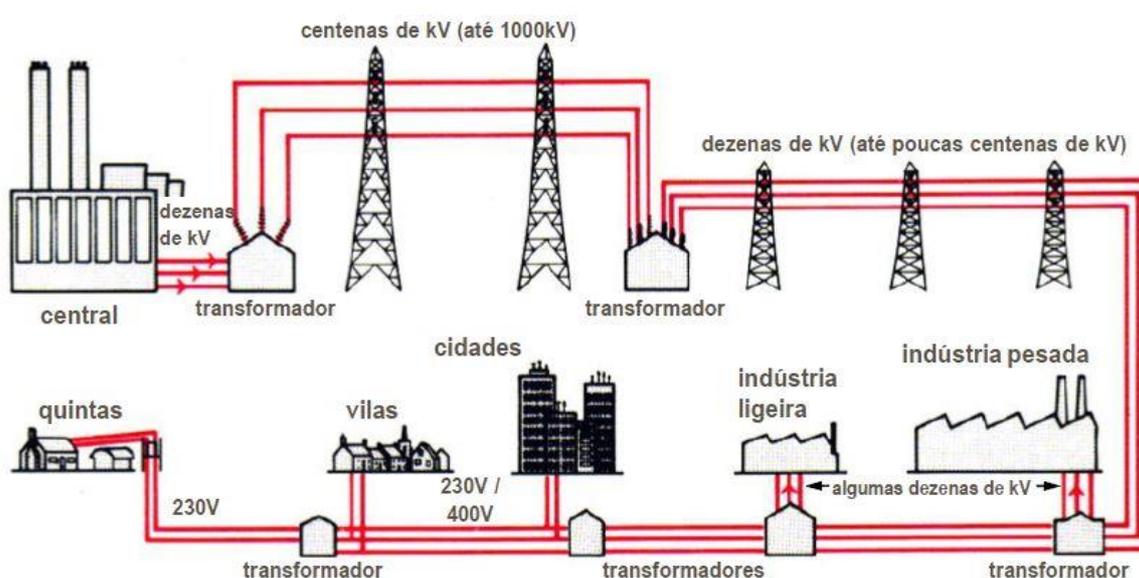


Figura 5-1 - Esquema PTDE (Produção, Transporte e Distribuição de Energia) [28]

5.2 Potência – Condições Sinusoidais

Quando se aplica uma tensão a uma carga, surge uma corrente elétrica. Isto corresponde ao fornecimento de energia elétrica que é transformada noutra. Em corrente alternada, esta energia elétrica é designada por energia ativa.

A energia ativa, no seu contexto físico, é o valor médio da potência instantânea, podendo ser definida como a potência recebida que é dissipada.

A potência ativa fornece então a informação de como a energia é gasta podendo ser medida da seguinte forma, considerando:

$$v = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (5.1)$$

Como uma tensão genérica sinusoidal, e,

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) \quad (5.2)$$

Como uma corrente genérica sinusoidal, onde:

t é o tempo, dado em segundos;

ω é a frequência angular ($2\pi f$), dada em rad/s;

f é a frequência da rede, dada em Hz;

φ Angulo entre a corrente e a tensão, dado em rad;

A potência instantânea é dada pelo produto da tensão instantânea e da corrente, pelo que a sua representação é:

$$p(t) = v(t)i(t) = 2VI \sin(\omega t) \sin(\omega t - \varphi) = VI \cos(\theta) - VI \cos(2\omega t - \varphi) \quad (5.3)$$

A equação 5.3 demonstra que a potência instantânea de um sistema monofásico não é constante. Tem uma componente oscilatória que possui duas vezes a frequência da linha adicionada à componente CC ($VI \cos(\varphi)$).

Decompondo o componente oscilatório e rearranjando a equação 5.3, vem:

$$p(t) = VI \cos(\varphi)[1 - \cos(2\omega t)] - VI \sin(\varphi) \sin(2\omega t) \quad (5.4)$$

A equação 5.4 encontra-se assim dividida em duas partes distintas. A primeira $VI \cos(\varphi)[1 - \cos(2\omega t)]$ tem um valor médio igual a $VI \cos(\varphi)$ e um componente oscilatório com duas vezes a frequência. Esta nunca fica negativa e, portanto, representa um fluxo unilateral da energia da fonte para carga [31].

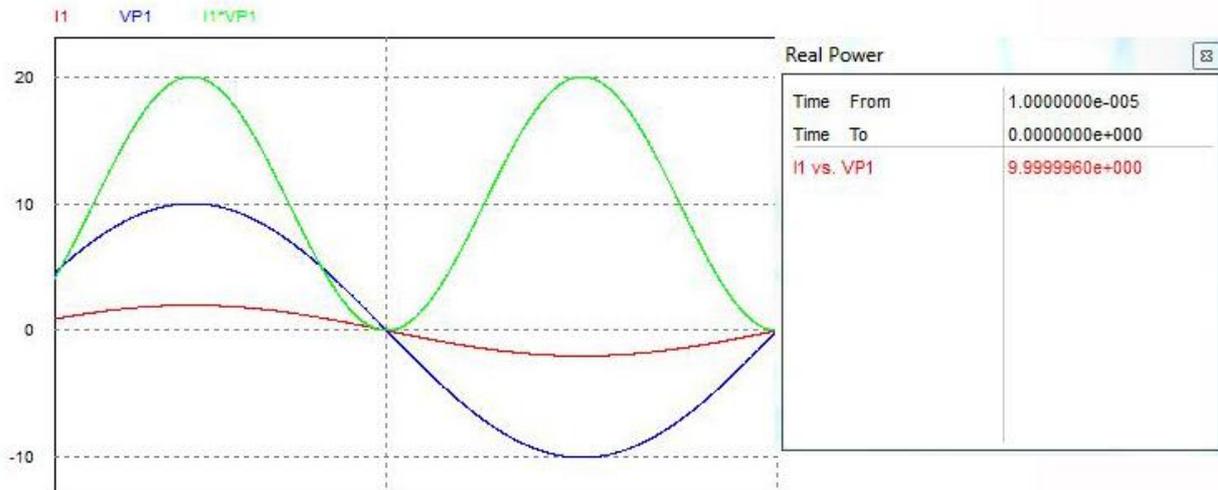


Figura 5-2 - potência nas condições sinusoidais ao longo do tempo (circuito resistivo: $U=10V$, $I=2A$, $R=10\Omega$)

Posto isto, a potência média ao longo de um período T pode ficar definida como:

$$P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v(t) \cdot i(t) dt \leftrightarrow P = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} p(t) dt \quad (5.5)$$

Onde :

T é o período, dado em segundos;

k é o número de períodos, positivo;

τ é o momento de iniciação da medição (t_0);

Pode-se também definir o valor médio de p através da abordagem mais usual:

$$P = VI \cos(\varphi) \quad (5.6)$$

A potência ativa é expressa em Watt (W).

Por sua vez, a segunda parte contém uma componente oscilatória pura com duas vezes a frequência e tem um valor de pico igual a $VI \sin(\varphi)$. Ao contrário da potência ativa, a potência reativa não produz qualquer trabalho útil nos componentes elétricos, estando este tipo de energia normalmente associado a componentes passivos, como condensadores.

Esta associação ocorre devido ao facto de esta potência oscilar entre os componentes armazenadores de energia e a fonte. Está relacionada com a reactância e com as energias magnéticas (W_{mag}) e elétricas (W_{ele}) armazenadas respetivamente na bobina e no condensador. Este tipo de potência não produz trabalho útil. No entanto, produz perdas por efeito Joule e gera correntes parasitas nos condutores, devido à variação do campo magnético [18].

Pode ser expressa da seguinte forma:

$$Q = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v(t)i \left(t - \frac{T}{4} \right) dt = VI \sin(\varphi) \quad (5.7)$$

A potência reativa é expressa em var (volt-ampere reativo).

Através da análise da figura 5.3, percebe-se que o fluxo de energia num sistema monofásico CA não é unidirecional e tão pouco é constante. Durante o intervalo de tempo correspondente à área “A”, a fonte está a fornecer energia à carga, ao passo que, relativamente ao intervalo correspondente à área “B”, uma certa percentagem da energia fornecida à carga está a ser reenviado de volta para a fonte. [31]

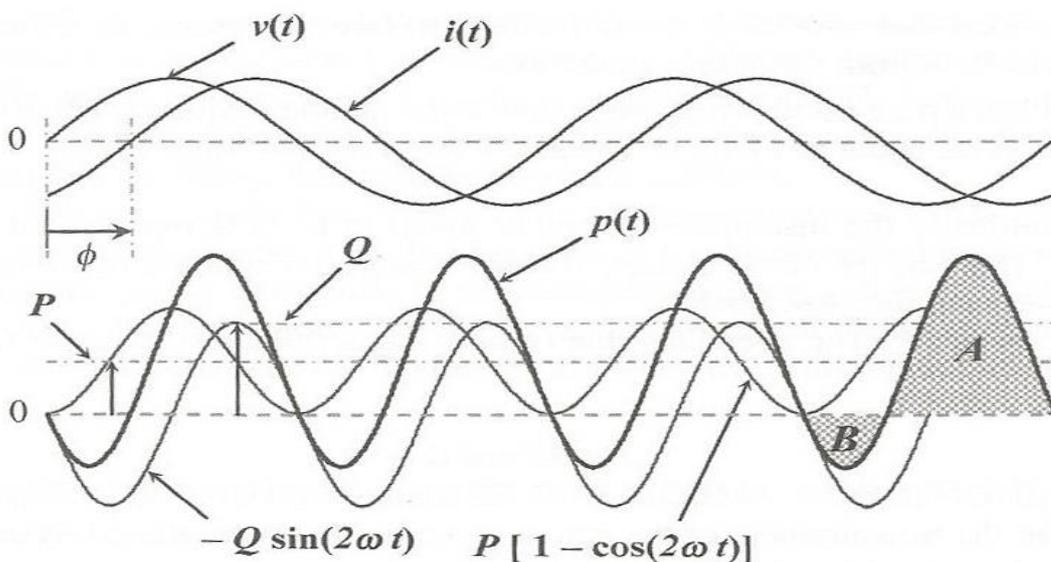


Figura 5-3 - Conceito convencional para a potência ativa e reativa [31]

Outro quantificador de potência normalmente utilizado é a potência aparente. Esta potência está associada a aspetos técnicos e operacionais. No que toca à parte operacional, sabendo a potência aparente, pode-se calcular as outras duas potências mais facilmente, se o fator de potência for conhecido. Na parte técnica, esta potência é usada como potência nominal de alguns aparelhos elétricos como é o caso dos transformadores, sendo o produto do valor de tensão e corrente nominais [29]. É dada pela equação:

$$S = \sqrt{\frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v^2(t)} \cdot \sqrt{\frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i^2(t)} = VI \quad (5.8)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5.9)$$

A potência aparente é expressa em va (volt-ampere).

Quanto ao fator de potência entende-se como a relação entre a potência transmitida à carga e a potência aparente. Sendo uma relação entre duas potências, o seu valor está compreendido entre 0 e 1:

$$fp = \frac{P}{S} = \cos(\varphi) \quad (5.10)$$

5.3 Potência – Condições Não Sinusoidais

A tensão e a corrente instantânea são dadas pela soma entre as duas componentes: a componente fundamental e as componentes harmónicas v_h e i_h [32]:

$$v = v_1 + v_h \quad (5.11)$$

$$i = i_1 + i_h \quad (5.12)$$

Onde a tensão e corrente fundamentais são expressas da seguinte forma:

$$v_1 = \sqrt{2} v_1 \sin(\omega t - \alpha_1) \quad (5.13)$$

$$i_1 = \sqrt{2} i_1 \sin(\omega t - \beta_1) \quad (5.14)$$

E a tensão e correntes harmónicas dados por:

$$v_h = V_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \quad (5.15)$$

$$I_h = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 1}^{\infty} I_h \sin(h\omega t - \beta_h) \quad (5.16)$$

Onde:

$$\theta_h = \beta_h - \alpha_h; \quad (5.17)$$

Os valores eficazes de corrente e tensão podem então ser definidos da seguinte forma:

$$V^2 = \frac{1}{kT} \int_T^{\tau+kT} V^2 dt = V_1^2 + V_h^2 \quad (5.18)$$

$$I^2 = \frac{1}{kT} \int_T^{\tau+kT} i^2 dt = I_1^2 + I_h^2 \quad (5.19)$$

Sendo as componentes harmónicas das grandezas anteriores definidas da seguinte forma:

$$V_h^2 = V_0^2 + \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h^2 \quad (5.20)$$

$$I_h^2 = I_0^2 + \sum_{h \neq 1}^{\infty} I_h^2 \quad (5.21)$$

É agora possível definir o índice de distorção harmónica mais utilizado, o THD, tanto para tensão como para corrente, sendo que as respetivas equações são:

$$THD_v = \frac{V_h}{V_1} = \sqrt{\left(\frac{V}{V_1}\right)^2 - 1} \quad (5.22)$$

$$THD_i = \frac{I_h}{I_1} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (5.23)$$

Recorrendo à analogia usada anteriormente no caso das tensões e correntes harmônicas (equações 5.11 e 5.12), sabendo que cada harmônico tem uma contribuição para a potência ativa, esta pode ser calculada da seguinte forma:

$$P = P_1 + P_h \quad (5.24)$$

Sendo P_1 a componente fundamental e P_h a contribuição dos harmônicos, inter-harmônicos e eventuais componentes contínuas, definidas da seguinte forma:

$$P_1 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v_1 i_1 dt \quad (5.25)$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos(\theta_1) \quad (5.26)$$

$$P_h = V_0 I_0 + \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h) \quad (5.27)$$

No caso da potência aparente deve ser feita uma separação entre a componente fundamental e as componentes harmônicas.

$$S^2 = S_{PQ}^2 + S_n^2 \quad (5.28)$$

A figura 5.4 demonstra a relação das potências acima referidas. De notar que aparece uma componente “**D**” denominada de potência de distorção. Esta componente foi introduzida por *Budeanu*, e caracteriza a perda da qualidade sobre condições não sinusoidais. Esta distorção é definida por:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (5.29)$$

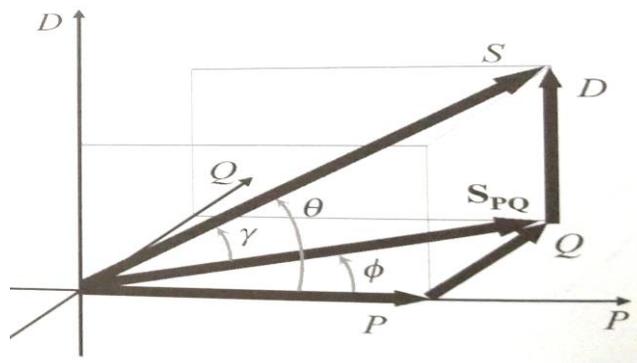


Figura 5-4 - Tetraedro das potências [31]

A potência aparente não fundamental pode ser decomposta em três partes distintas [33]:

$$S_n = \sqrt{S^2 - S_{PQ}^2} \leftrightarrow S_n^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_h^2 \quad (5.30)$$

Os quais podem ser decompostos em:

- D_I^2 corrente de distorção que pode ser expresso : $D_I = V_1 I_h$ **VA_r** (5.31)

- D_V^2 tensão de distorção, expresso por : $D_V = V_h I_1$ **VA_r** (5.32)

- S_h^2 a potência aparente harmônica $S_h = V_h I_h$ **VA** (5.33)

Q representa a componente de energia reativa conservada e D a componente não conservada. Esta componente não flui pelo sistema elétrico como as restantes potências até agora mencionadas, sendo que, por esta razão, não é tratada como uma potência por alguns autores. [18]

5.4 Série de Fourier

Qualquer sinal periódico $f(t)$ pode ser representado como a soma de sinusoides com frequência múltipla da do original. Quer isto dizer que qualquer função de período finito pode ser representada por uma série de elementos trigonométricos, uma componente continua, fundamental e em múltiplos inteiros desta frequência. [34] [35]

A função genérica $f(t)$ é dada por:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \quad (5.34)$$

Onde:

- a_0 é o valor médio de $f(t)$;
- a_n e b_n são os coeficientes de Fourier que nos fornecem a componente retangular do harmónico n ;
- ω é a frequência angular dada por : $\omega = \frac{2\pi}{T}$;

Sabendo que a magnitude e a fase são expressas da seguinte forma, respetivamente:

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (5.35)$$

$$\theta_h = \tan^{-1} \left(\frac{a_n}{b_n} \right) \quad (5.36)$$

Onde:

- n é a ordem do harmónico;
- c_n representa a magnitude do componente harmónico de ordem h ;
- θ_n representa a fase do componente harmónico da mesma ordem;

Os coeficientes de *Fourier* são expressos da seguinte forma:

$$a_0 = \frac{1}{T_p} \int_{-\frac{T_p}{2}}^{\frac{T_p}{2}} f(t) dt \quad (5.37)$$

$$a_n = \frac{2}{T_p} \int_{-\frac{T_p}{2}}^{\frac{T_p}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (5.38)$$

$$b_n = \frac{2}{T_p} \int_{-\frac{T_p}{2}}^{\frac{T_p}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (5.39)$$

De acordo com cada simetria são realizadas simplificações aos coeficientes de *Fourier*. Estas podem ser as seguintes:

- Simetria Par – Uma função $f(t)$ é par se a seguinte condição se verificar:

$$f(t) = f(-t) \quad (5.40)$$

Para este caso o coeficiente $b_n = 0$, logo a função só irá ter termos em *cos* e pode também assim incluir componentes contínuas. É expressa da seguinte forma:

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (5.41)$$

- Simetria ímpar:

$$f(t) = -f(-t) \quad (5.42)$$

Aqui o coeficiente $a_n = 0$ e a função só irá ter termos em *sen* sendo expressa da seguinte forma:

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (5.43)$$

- Simetria meia-onda – uma função $f(t)$ possui simetria de meia onda se a seguinte condição se verificar:

$$f(t) = -f\left(t + \frac{T}{2}\right) \quad (5.44)$$

Nesta situação, os termos pares serão todos eles nulos, pelo que, com este tipo de simetria, apenas iremos ter termos ímpares. Se n for ímpar, tem-se que:

$$\cos(n\omega t + n\pi) = -\cos(n\omega t) \quad (5.45)$$

O que irá resultar com que a_n seja:

$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (5.46)$$

E que b_n seja:

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (5.47)$$

Se n for par, fica que:

$$\cos(n\omega t + n\pi) = \cos(n\omega t) \quad (5.48)$$

O que como consequência irá fazer com que a_n e $b_n = 0$.

6. ARQUITETURA DO SISTEMA

Este capítulo refere-se à arquitetura do circuito desenvolvido, onde se descreve a alimentação do sistema, os sensores de tensão e corrente, os condicionadores de sinal de tensão e corrente, o medidor de qualidade de energia o FLUKE 345 PQ *Clamp Meter*, a *Raspberry pi* e a MX6 Sabre. Também é dada uma breve explicação de como o código foi desenvolvido.

6.1 Alimentação do sistema

Para que o sistema seja autónomo é necessária a criação de um circuito eletrónico para alimentação do mesmo. Pretende-se com este projeto utilizar a energia proveniente da rede de forma a alimentar todo o sistema necessário à implementação do contador.

Uma vez que a rede contém uma componente alternada e todos os componentes integrados no sistema precisam de ser alimentados em CC, é necessário desenvolver uma fonte de alimentação capaz de fornecer condições para que todo o sistema funcione corretamente. Assim, é fundamental que se apresente um dispositivo capaz de fazer a conversão de CA para CC. A figura 6.1 ilustra a fonte desenvolvida para a alimentação total do sistema.

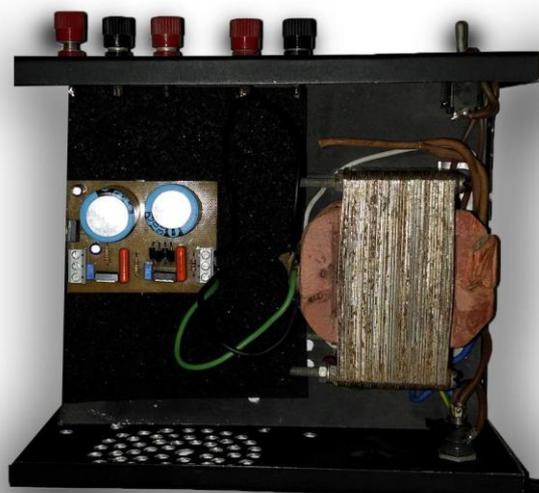


Figura 6-1 - Alimentação do sistema (placa + transformador)

A figura 6.2 representa o esquema de montagem do sistema em *Psim* para a alimentação do projeto, este terá de ser capaz de converter a tensão da rede (~230V, 50Hz em Portugal) para 15V CC.

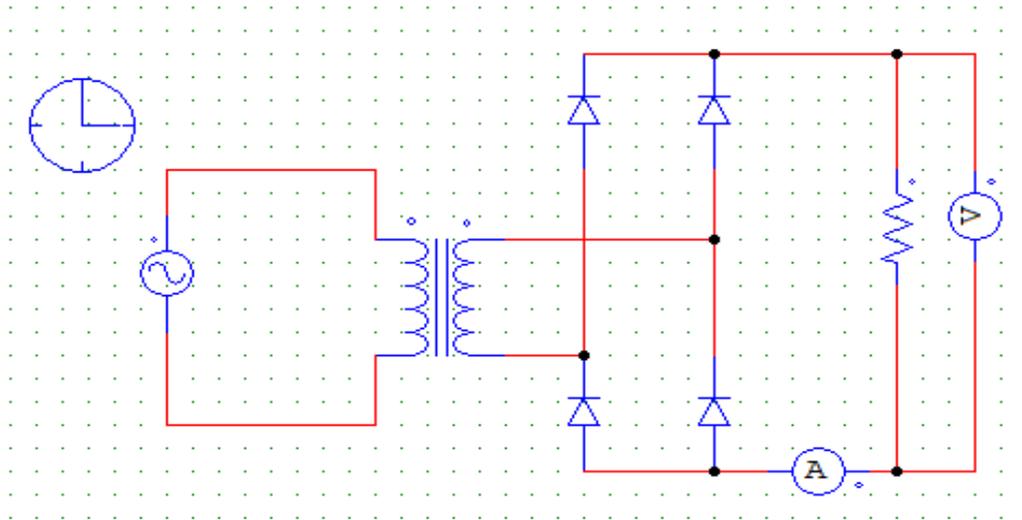


Figura 6-2 - Esquema fonte em *Psim*

A primeira parte do sistema possui um transformador (230V:15V), isto vai fazer com que haja um abaixamento da tensão. Depois de a tensão estar entre os 15V CA, é indispensável que esta se transforme em 15V CC, assim é utilizado um retificador de onda completa não-controlado. Após a implementação do retificador, a tensão e corrente vão passar a ter um valor médio diferente de zero, este valor é dado por:

$$V_{d,méd} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin(\omega t) d\theta = \frac{2V_m}{\pi} \quad (6.1)$$

O resultado da tensão e corrente proveniente do circuito da figura 6.1 surge abaixo representado:

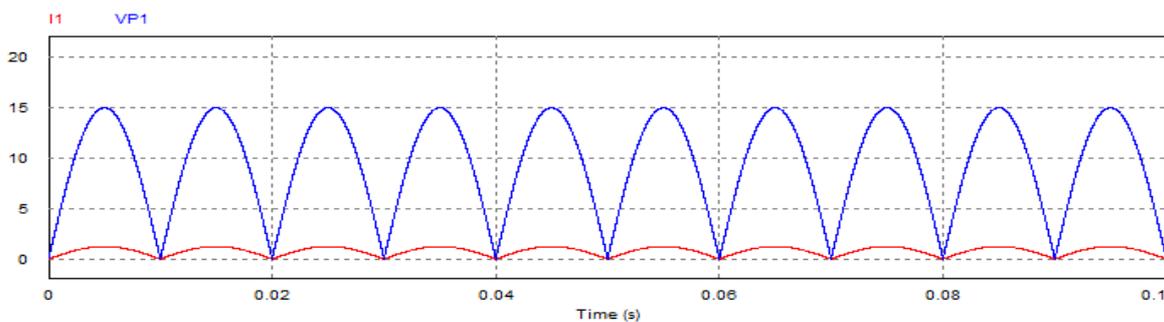


Figura 6-3 - Tensão e Corrente (Transformador + Retificador) em *Psim*

Assim, pode-se verificar que, depois de implementado o retificador, a tensão de saída ainda não é a desejada. Para que a tensão não varie de 15V a 0V é então adicionado um condensador à saída, isto vai fazer com que a tensão de saída varie pouco e aumente, passando a possuir um valor igual ao valor de pico da onda antes de ser retificada.



Figura 6-4 - tensão e Corrente saída da fonte (Transformador + Retificador + condensador) em Psim

Depois de aplicado o condensador, é necessário arranjar forma de fornecer as tensões -15V, 15V e 5V individualmente para a alimentação dos sensores, acondicionadores (tensão e corrente) e do microprocessador. Uma forma simples e de baixo custo de fornecer a tensão desejada é recorrendo a reguladores de tensão. Foram utilizados respetivamente o 7915CT, L7815CV e L7805CV (Anexo VI).

6.2 Sensor de Tensão de Efeito Hall

Para medir o sinal de tensão necessária para a leitura, foi usado o sensor de tensão CYHVS025A. O Sensor e a placa correspondente podem ser vistos na figura 6.5.



Figura 6-5 - Placa do sensor de Tensão (GEPE)

A placa contém dois conectores: um verde e um laranja. O conector verde é o conector de entrada, ou seja, é a parte da placa que está em contacto com a rede elétrica, encontrando-se colocado em paralelo com a carga. Quanto ao conector laranja, possui quatro terminais: um GND, um para alimentação de +15V, um para alimentação -15V e um terminal de saída do sensor para o ADC. Existem alguns condensadores de desacoplamento no secundário do sensor (junto ao conector laranja) de forma a filtrar ruído que possa surgir na alimentação.

Este sensor apresenta uma corrente nominal no primário (I_p) de 10mA, uma relação de tensão de 2500:1000. Como $N_p I_p = N_s I_s$, então a corrente no secundário (I_s) será igual a 2,5 vezes a corrente do primário (I_p). [38] (Anexo VII)

Com base nas características do sensor e de acordo com a tensão que se pretende medir, calculou-se a resistência a colocar no primário do sensor. Este valor foi definido tendo em conta o valor eficaz da tensão nominal da rede elétrica.

$$R_i = \frac{V_{max}}{I_{pn}} = \frac{230}{0.01} = 23 \text{ k}\Omega \quad (6.2)$$

Também é necessário proceder ao dimensionamento de uma resistência R_m para transformar o sinal da saída do sensor num sinal de tensão para que este possa ser adquirido pelo ADC. O fabricante do sensor recomenda que o valor desta resistência se encontre entre 100 Ω e 350 Ω para uma corrente nominal do primário de 10mA.

$$R_m = \frac{V_{\max_ADC}}{I_{sn}} = \frac{3}{0.025} = 120 \, \Omega \quad (6.3)$$

Estas resistências R_i e R_m podem ser vistas no esquema de ligações do sensor CYHS025 na figura 6.6.

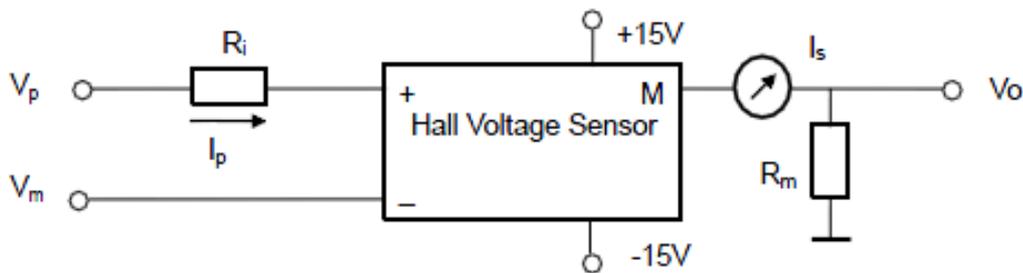


Figura 6-6 - Esquemático simplificado do sensor CYHS025 [38]

Este sensor apresenta uma boa linearidade e precisão, alta imunidade a interferências externas e baixo tempo de resposta. Os valores reais medidos do sensor podem ser observados através da figura 6.7.

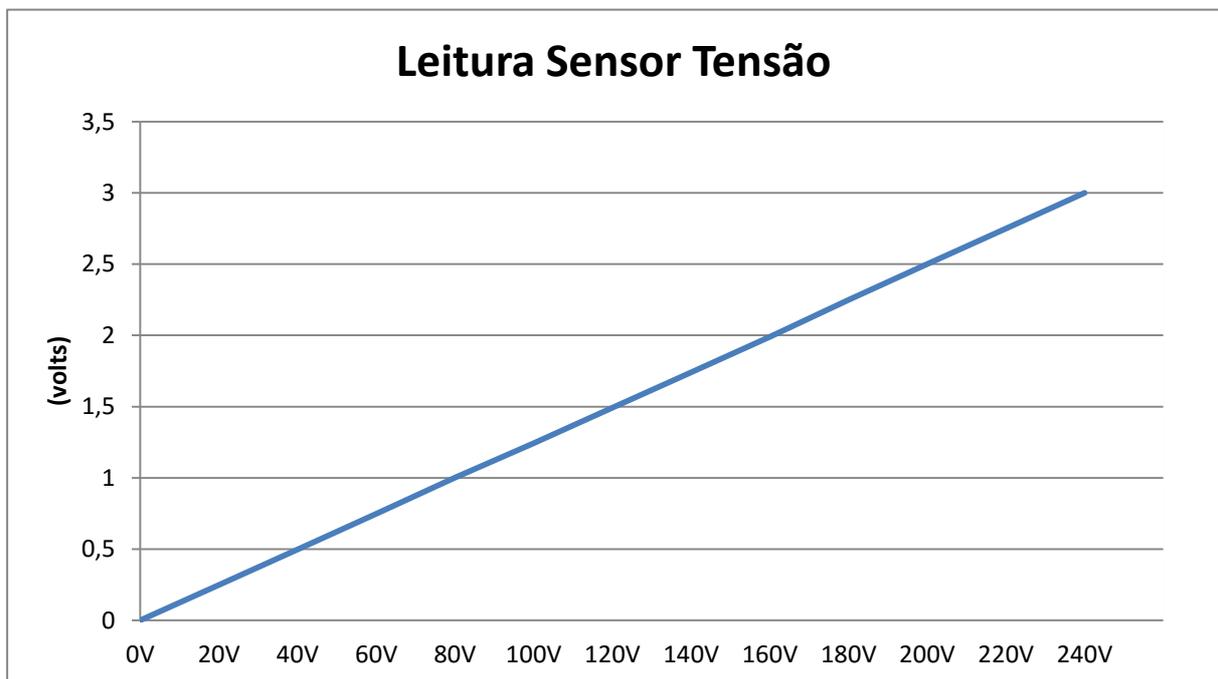


Figura 6-7 - Valores reais do sensor de tensão

6.3 Sensor de Corrente de Efeito Hall

Para medir o sinal de corrente necessária para a leitura, foi usado o sensor de corrente LA 55-p da LEM. O Sensor e a placa correspondente podem ser vistos na figura 6.8.



Figura 6-8 - Placa sensor de Corrente (GEPE)

A placa do sensor de corrente permite realizar a medição de corrente de forma isolada. Esta possui apenas um conector laranja com quatro terminais: um GND, um para alimentação de +15V, um para alimentação -15V e um terminal de saída do sensor para o ADC. Existem condensadores de desacoplamento junto ao conector de forma a filtrar ruído que possa surgir na alimentação.

Este sensor tem a particularidade que se prende com o facto de se poder dar voltas do fio condutor à volta do sensor para que haja uma maior resolução do mesmo. No sistema usado nesta dissertação, são dadas três voltas do fio condutor ao sensor, fazendo com que a gama de correntes medidas pelo sensor seja reduzida.

O sensor utilizado apresenta uma corrente nominal no primário (I_p) de 50A e uma relação de transformação de 1:1000. A corrente no secundário do sensor é dada pela seguinte equação:

$$I_s = \frac{I_p}{1000} N \quad (6.4)$$

Onde N corresponde ao número de voltas do fio. (Anexo VII)

A resistência R_m , tal como no sensor de tensão, é necessária para transformar o sinal da saída do sensor num sinal de tensão para que este possa ser adquirido pelo ADC. O fabricante

do sensor recomenda que o valor desta resistência se encontre entre 50Ω e 160Ω com uma alimentação de 15V e para uma temperatura ambiente de operação de 70°C . [39]

O esquema de ligações do sensor LA 55-P pode ser visto na figura 6.9.

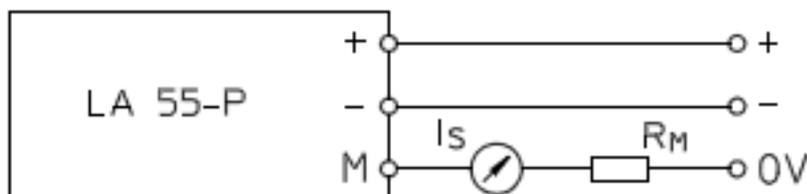


Figura 6-9 - Esquemático simplificado do sensor LA 55-p [39]

Este sensor apresenta uma boa linearidade e precisão, alta imunidade a interferências externas e baixo tempo de resposta. Os valores reais medidos do sensor podem ser observados através da figura 6.10.

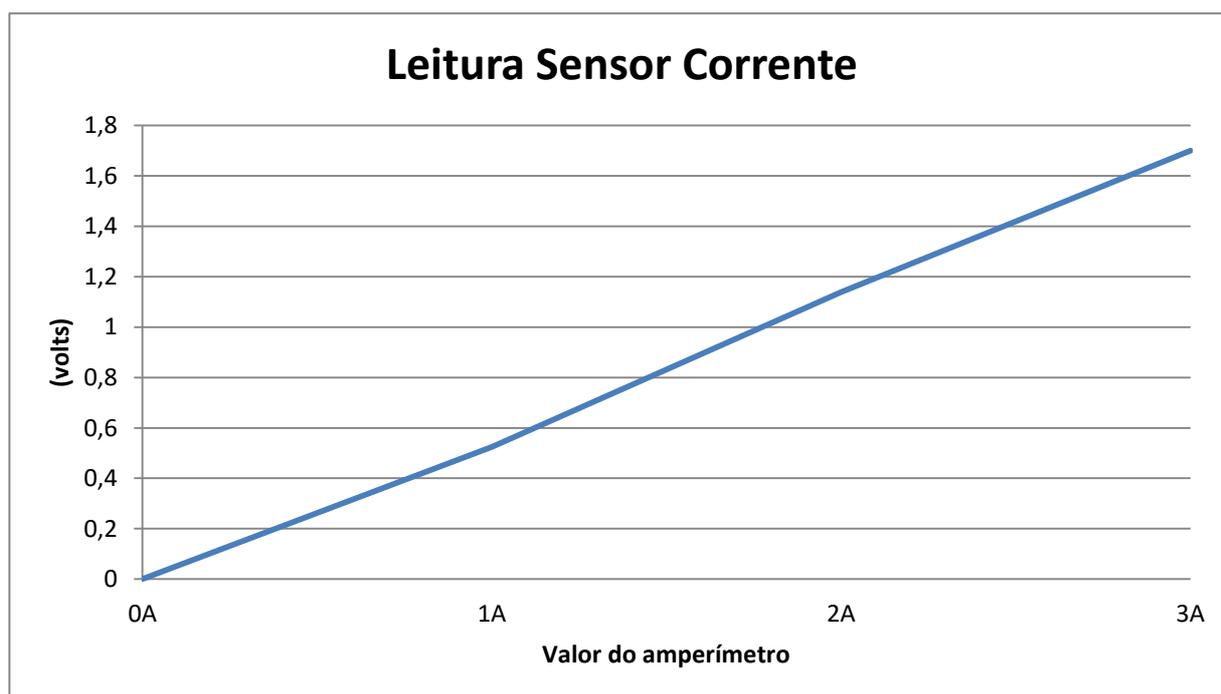


Figura 6-10 - Valores reais lidos do sensor de corrente

6.4 Condicionador de Sinal - Tensão

Nesta dissertação a leitura dos parâmetros da corrente e tensão por parte dos sensores é sinusoidal, ou seja, os valores recebidos pelos mesmos variam entre valores positivos e negativos. Para que os dados provenientes dos sensores possam ser obtidos pelos ADC, estes terão de estar compreendidos entre os valores limite dos mesmos. Os ADC usados neste projeto pertencem ao *TSM320F28027*, sendo que estes só aceitam valores de tensão na gama de 0V a 3,3V.

Para que a leitura do sinal de tensão seja aceite pelo ADC, é necessário a implementação de um circuito eletrônico capaz de fazer com que os dados do sensor sejam unicamente positivos. Para isso recorreu-se à montagem de um condicionador de sinal de tensão, representado na figura 6.11.



Figura 6-11 - Placa acondicionador de tensão

Este circuito é composto por um somador inversor, um inversor de ganho unitário e um sistema de proteção. O somador faz a soma de dois sinais de tensão, neste caso, o sinal correspondente ao sensor que possui uma componente alternada e outro sinal de componente contínua.

Este sinal terá de possuir um valor aproximado de metade dos valores da gama do ADC para que nunca sejam ultrapassados esses limites aquando da leitura da tensão. Para tal aplicou-se o somador inversor representado pelo esquema da figura 6.12.

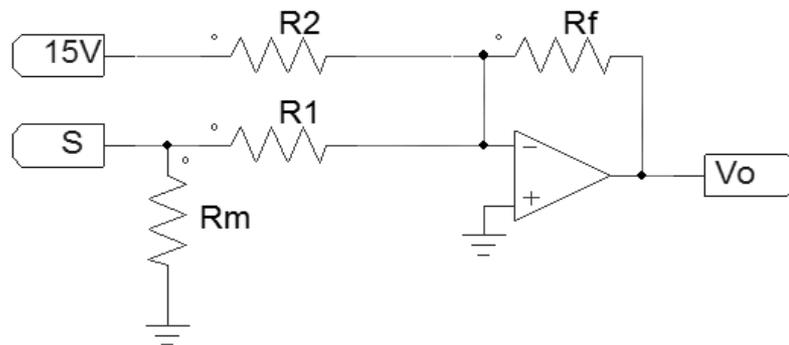


Figura 6-12 - Somador Inversor para sensor de tensão

A fórmula para determinar a tensão de saída do somador inversor é dada pela seguinte equação:

$$V_0 = -\left(\frac{R_f}{R_2} 15 + \frac{R_f}{R_1} S\right) \quad (6.5)$$

Através da equação 6.5, tendo em conta os valores de tensão pretendidos, definiu-se o valor das resistências: $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$ e $R_f = 1k\Omega$. Quanto ao valor da resistência R_m , é referido no capítulo 6.2.

Depois da aplicação do somador inversor, a tensão de saída passa a ser negativa. Como o ADC só aceita valores positivos, é necessário a introdução de um circuito para que a saída seja positiva. Assim, aplica-se um inversor de ganho unitário como representado na seguinte figura 6.15.

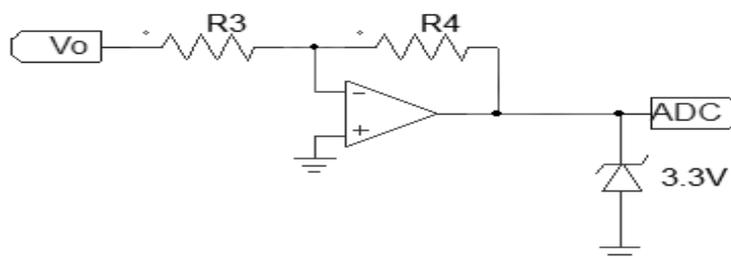


Figura 6-13 - Inversor ganho unitário + Zenner

Onde $R_3 = 10k\Omega$ e $R_4 = 10k\Omega$, de seguida aplica-se um díodo de Zenner ao circuito fazendo com que, caso haja uma subida inesperada dos valores da tensão, esta nunca ultrapasse os 3,3V protegendo assim o ADC.

6.5 Condicionador de Sinal – Corrente

Tal como já foi referido no Subcapítulo 6.4, para que os dados provenientes dos sensores possam ser obtidos pelos ADC, estes terão de estar compreendidos entre os valores limite dos mesmos.

Para que a leitura do sinal de corrente seja aceite pelo ADC, é necessário a implementação de um circuito eletrónico capaz de fazer com que os dados do sensor sejam unicamente positivos. Para isso recorreu-se à montagem de um condicionador de sinal de corrente, representado na figura 6.14.

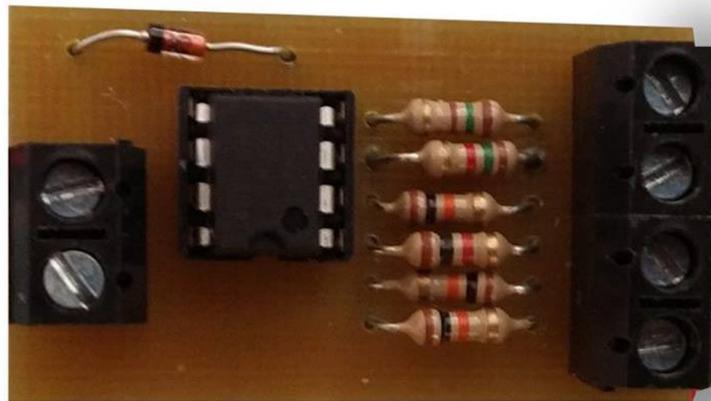


Figura 6-14 - Placa acondicionador de corrente

O circuito é igual ao do sensor de tensão mudando só a forma como é montada a resistência R_m e portanto é composto por um somador inversor, um inversor de ganho unitário e um sistema de proteção. O somador faz a soma de dois sinais de corrente, neste caso, o sinal correspondente ao sensor que possui uma componente alternada e outro sinal de componente contínua.

Este sinal terá de possuir um valor aproximado de metade dos valores da gama do ADC para que nunca sejam ultrapassados esses limites aquando da leitura da corrente. Para tal aplicou-se o somador inversor representado pelo esquema da figura 6.15

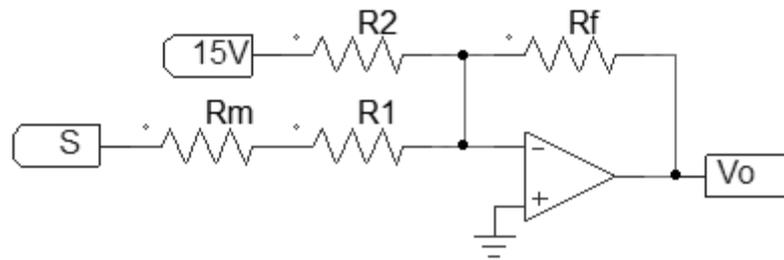


Figura 6-15 - Somador Inversor para sensor de corrente

A fórmula para determinar a tensão de saída do somador inversor é dada pela seguinte equação:

$$V_0 = -\left(\frac{R_f}{R_2} 15 + \frac{R_f}{R_1 + R_m} S\right) \quad (6.6)$$

Através da equação 6.6, tendo em conta os valores de tensão pretendidos, definiu-se o valor das resistências: $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 10k\Omega$ e $R_f = 1k\Omega$. O valor da resistência R_m é referido no subcapítulo 6.3.

Depois da aplicação do somador inversor, a tensão de saída passa a ser negativa. Como o ADC só aceita valores positivos, é necessário a introdução de um circuito para que a saída seja positiva. Assim, aplica-se um inversor de ganho unitário como representado na seguinte figura 6.16.

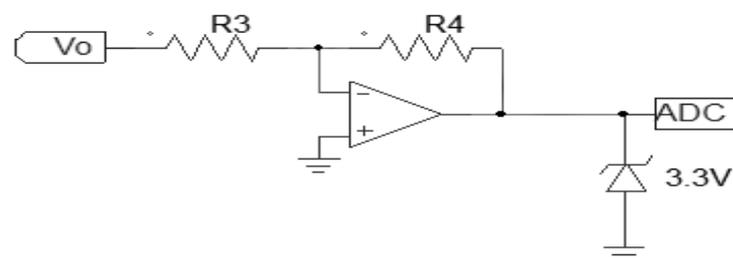


Figura 6-16 - Inversor ganho unitário + Zenner

Onde $R_3 = 10k\Omega$ e $R_4 = 10k\Omega$, de seguida aplica-se um díodo de Zenner ao circuito fazendo com que, caso haja uma subida inesperada dos valores da tensão, esta nunca ultrapasse os 3,3V protegendo assim o ADC.

6.6 Digital Signal Processor

Para a realização do contador de energia digital é obrigatório o uso de um microprocessador para leitura dos dados lido pelos sensores.

Nesta dissertação foi utilizado o DSP *TMS320F28027* da *Texas Instruments* [40]. Este DSP é vendido em conjunto com a respectiva placa de desenvolvimento. Para o desenvolvimento do projeto foi usado o conjunto *C2000 Piccolo LaunchPad Evaluation kit*. Este conjunto pode ser visto na seguinte figura 6.17.

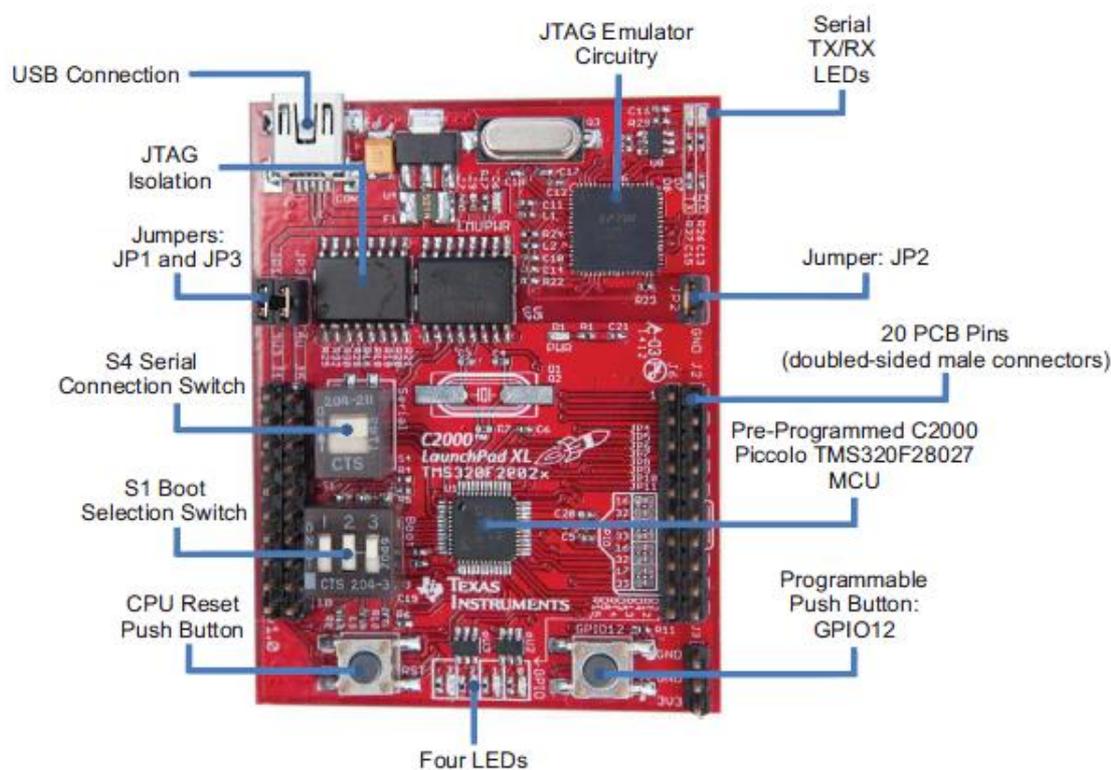


Figura 6-17 - C2000 Piccolo LaunchPad Evaluation kit [40]

Esta placa de desenvolvimento, apesar do seu baixo custo, é uma solução funcional, sendo que possui: um CPU de 32-bits com frequência de relógio de 60MHz; memória *on Board flash* de 32KB; oito canais PWM (os quais podem ser programados para serem de alta resolução); treze canais ADC; quatro *timers* de 32-bits; permite comunicação série; já possui protocolo I2C, entre outros. [40] (Anexo VIII)

Para o desenvolvimento da dissertação de mestrado foram utilizados, nesta placa, dois ADC, dois timers e a UART. Os ADC foram usados para obtenção dos sinais de corrente e da tensão provenientes da carga. Um dos *timers* foi usado para a amostragem do ADC e o outro para fazer a contagem dos tempos. A UART foi utilizada para fazer a comunicação série com

a *Raspberry pi*, para posteriormente esta última converter em tramas TCP/IP, permitindo a obtenção dos dados pelo *Display*.

A plataforma de desenvolvimento utilizada para programar o DSP foi o *Code Composer Studio*. Esta permite a programação da maioria do *Software* desenvolvido em linguagem C, podendo ser complementada com a instalação de um programa externo, o *ControlSuit*, que possui alguns exemplos e tutoriais para a introdução e manuseamento tanto do CCS como do *TMS320F28027*. O *ControlSuit* possui ainda algumas bibliotecas e funções pré-definidas que tornam a programação mais amigável para o programador.

Na figura 6.18 encontra-se o ambiente de desenvolvimento do CCS.

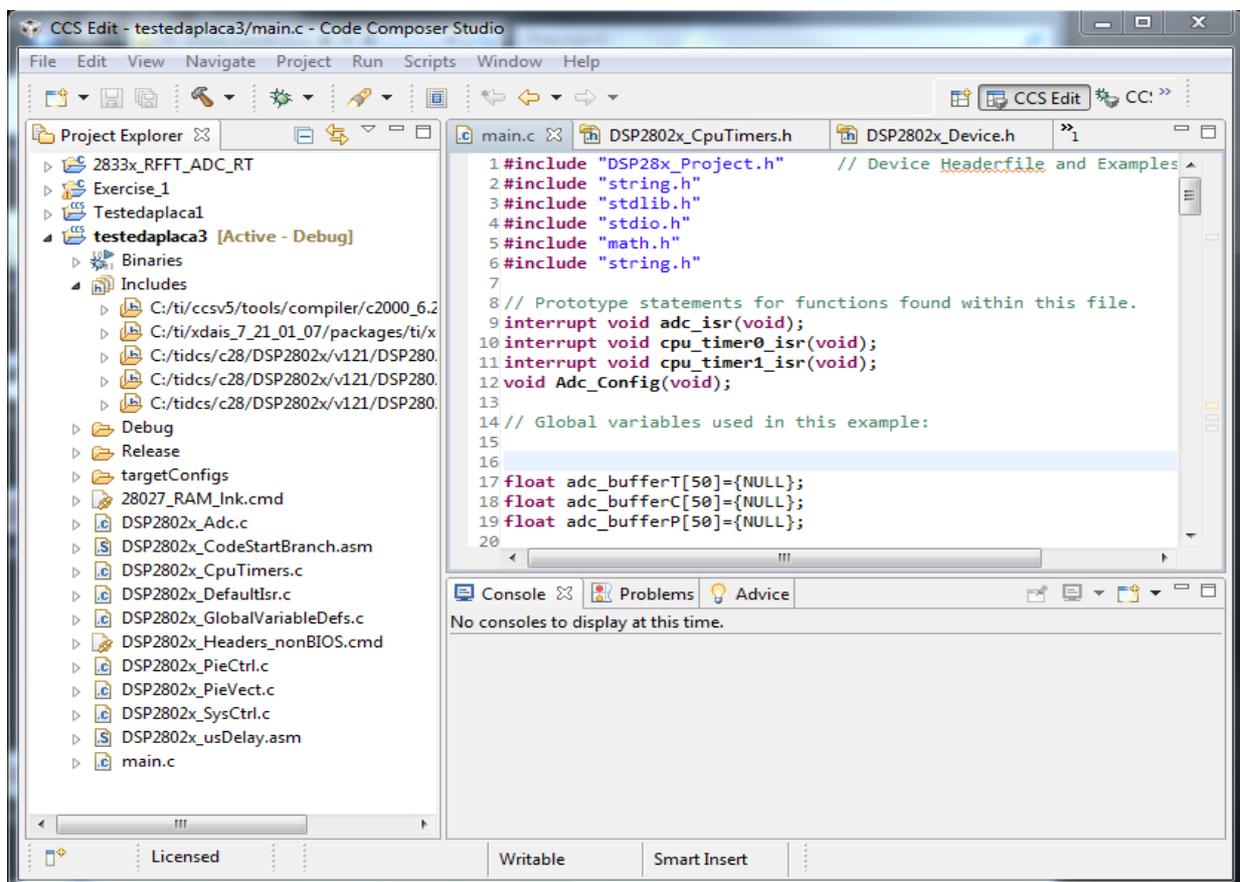


Figura 6-18 - Ambiente gráfico *Code Composer Studio*

O CCS permite ainda que sejam observadas, em tempo real, variáveis internas do sistema. Estas variáveis, para poderem ser observadas em tempo real, têm de estar declaradas no sistema como variáveis globais.

6.7 FLUKE 345 PQ *Clamp Meter*

Para fazer a comparação dos resultados obtidos do contador, utilizou-se um medidor de potência, o FLUKE 345 PQ *Clamp Meter*. Este é um aparelho robusto e preciso, sendo que é ideal para monitorizar as cargas em sistemas monofásicos. É relativamente pequeno e possui um modo de operação simples, sendo fácil de transportar e manusear, tal como se pode evidenciar através da figura 6.19.



Figura 6-19 - Fluke 345 PQ *Clamp Meter*

O FLUKE 345 executa de forma eficaz as tarefas básicas como a medição do fator de potência e energia, oferecendo a flexibilidade necessária para resolver a maioria dos problemas de energia em ambientes comerciais, industriais e residenciais. Este medidor combina as funções de amperímetro “pinça”, osciloscópio, registador de dados e medidor de energia digital. Adicionalmente, o amperímetro de efeito Hall faz com que a medição seja possível sem a necessidade de interromper o circuito. [41]

Este aparelho tem como características:

- Corrente CA/CC: medição braçadeira ativa para corrente CA até 1400A *rms* e CC até 2000A sem interrupção do circuito;
- Alta classificação de segurança: 600V CAT IV;
- Precisão em ambientes ruidosos: medidor braçadeira funciona mesmo com formas de onda distorcidas presentes nas cargas;
- Registo de dados: identifica falhas intermitentes, registando qualquer parâmetro de qualidade de energia por alguns minutos, ou mais de um mês incluindo harmônicos;
- Verificação de Baterias: a medição de CC com ondulação (%) para sistemas de bateria;

- Solucionar problemas de harmônicos: analisa harmônicos digitalmente ou graficamente;
- *Inrush*: Captura e analisa disparos intempestivos, de 3s para 300s;
- *Download USB*: faz *download* dos dados registrados com o *Software* aplicativos *PowerLog* para visualizar tendências e criação de relatórios;
- Eliminação da bateria: Para longas sessões de funcionamento usa outra forma de alimentação;
- Visualização de gráficos e geração de relatórios: usa um analisador de potência com *PowerLog*;
- Energia Trifásica: construído para cargas equilibradas;
- Fácil de usar: *Display* colorido para fácil visualização das formas de onda e de eventos (como harmônicos). (Anexo IX)

6.8 Raspberry pi & MX6 Sabre

A placa *Raspberry pi* foi usada para fazer a ponte entre a *TMS320F28027* e a *MX6 Sabre*. A sua função é converter as tramas provenientes da UART do DSP para TCP/IP, para depois serem lidos pela *MX6*. A figura representa a *Raspberry pi* e os pinos usados para receber os dados 6.20.

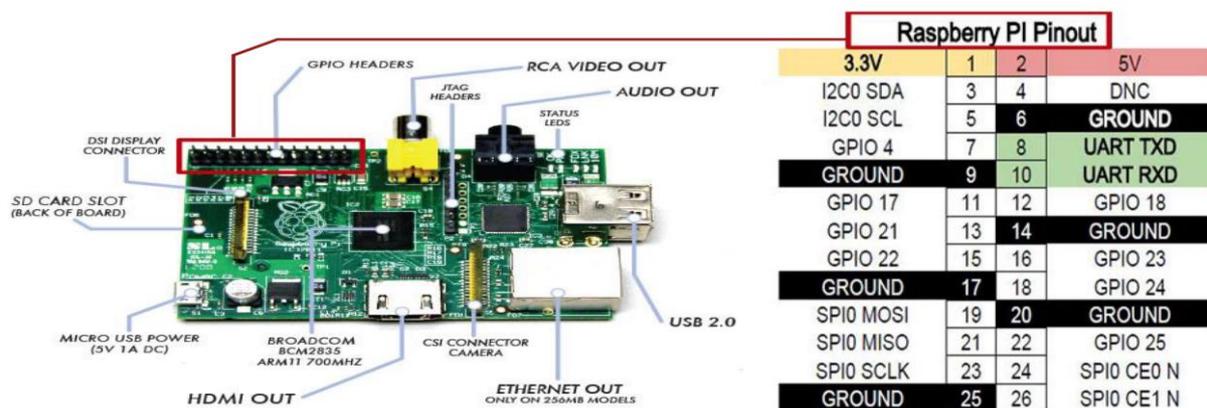


Figura 6-20 - Esquema Raspberry pi + pinos (UART)

A *Raspberry pi* é uma placa muito utilizada, sendo que é possível encontrar inúmeros exemplos para a sua programação na *Internet*, facilitando a sua programação. O exemplo de código usado para iniciar a configuração da placa, neste trabalho, pode ser visto através do tutorial “*Raspberry for Noobs (New out of the Box Software)*” [42].

O MX6 Sabre é usado para fazer a integração com o *Display*. Esta placa recebe as tramas TCP/IP provenientes da *Raspberry pi* através do protocolo TCP/IP. A visualização da placa e do *Display* acoplados pode ser vista na figura 6.21

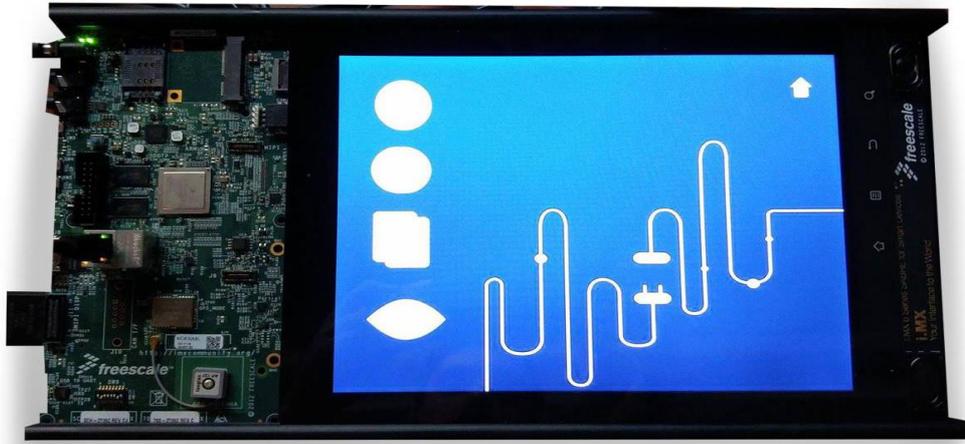


Figura 6-21 – MX6 Sabre + *Display*

Ambas as placas foram emprestadas pela unidade da BOSCH da Universidade do Minho e já vinham com a programação da ligação entre a *Raspberry-MX6* desenvolvida. Relativamente a este projeto, o que se teve de desenvolver para estas placas foi criar a aplicação QT, para elaboração do menu, e programar a obtenção dos dados por parte da *Raspberry pi*.

Quanto ao menu, pode ser visualizado na figura 6.21. No ponto em que se encontra, apenas é possível aceder a uma opção, visão dos dados em tempo real (olho).

6.9 Explicação do Código

Como já foi referido no subcapítulo 6.6, a plataforma onde foi desenvolvido o código foi o CCS. Esta ferramenta possibilita uma fácil integração/aplicação das bibliotecas e funções feitas pela Texas, proporcionando uma programação amigável ao programador.

Primeiramente, foi necessário recorrer à implementação das extensões necessárias para fazer a ligação com a placa, com os módulos externos (.c) e com as bibliotecas, bem como alterar alguns padrões que não estavam previamente definidos pelo CCS na criação de um novo projeto. Isto foi realizado a partir de um tutorial feito para a DSP *TMS320F28027*, elaborado também pela Texas.

Depois de concluído o primeiro passo, foram utilizados os módulos externos para a configuração dos ADC, dos Timers e da UART, que são respetivamente “DSP 2802x_ADC.c”, “DSP 2802x_Cpu_Timers.c” e “DSP 2802x_Sci.c” e os respetivos *header files*. Logo que concluído todo o processo de configuração do sistema, ligações entre módulos, *header files* e ligações da placa, é possível começar a programar e implementar o código necessário ao sistema.

Para obtenção dos valores provenientes das tensões e correntes eficazes, utilizou-se o método gráfico. Este pode ser usado para obter os valores *RMS* de qualquer onda não sinusoidal que varie no tempo, obtendo certo número de pontos no tempo da forma de onda. O método de cálculo é o mesmo para ambas as metades de uma forma de onda CA, considerando-se apenas meio ciclo positivo. O valor *RMS* de uma forma de onda pode ser assim encontrado com precisão, tomando valores instantâneos espaçados ao longo da forma de onda. A explicação pode ser vista através da análise da figura 6.22.

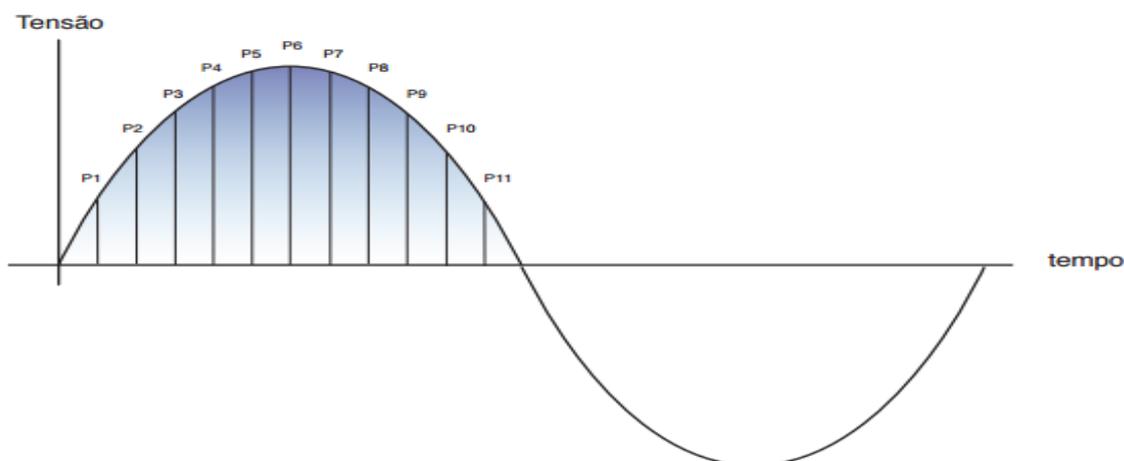


Figura 6-22 - Cálculo RMS (método gráfico - tensão)

Tabela 6-1 - Pontos do método gráfico (tensão)

Pontos	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12
Tensão	V1	V2	V3	V3	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	0V

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2 + V_6^2 + V_7^2 + V_8^2 + V_9^2 + V_{10}^2 + V_{11}^2 + 0^2}{12}} \quad (6.7)$$

A metade positiva da forma de onda é dividida em qualquer número de “n” porções iguais. Quanto mais porções ou pontos se obtiver, mais preciso será o resultado final. Como o sistema implementado tem de trabalhar numa rede doméstica (monofásica, 50Hz), o período da onda será de 20ms. Para se obter um bom número de pontos de forma a ter uma maior precisão, pode ser feita uma frequência de amostragem de 100x a frequência original. Os valores obtidos serão posteriormente guardados num *buffer* para posteriores cálculos.

Depois de obtidos os valores eficazes, é possível determinar as potências. Para obtenção dos valores do THD, utilizou-se a fórmula das potências.

$$THD = \sqrt{\frac{\sum P_{Harmônicos}}{P_{Fundamental}}} \cdot 100 \quad (6.8)$$

Quando à transmissão dos dados calculados, eles são enviados através da comunicação série. Esta função é feita através do envio de tramas para a placa *Raspberry pi* e posteriormente convertido em tramas TCP/IP para ser obtido pelo conjunto do *Display*, tal como já foi referido nos subcapítulos 6.8 e 6.9. O esquema pode ser visto através da figura 6.23.

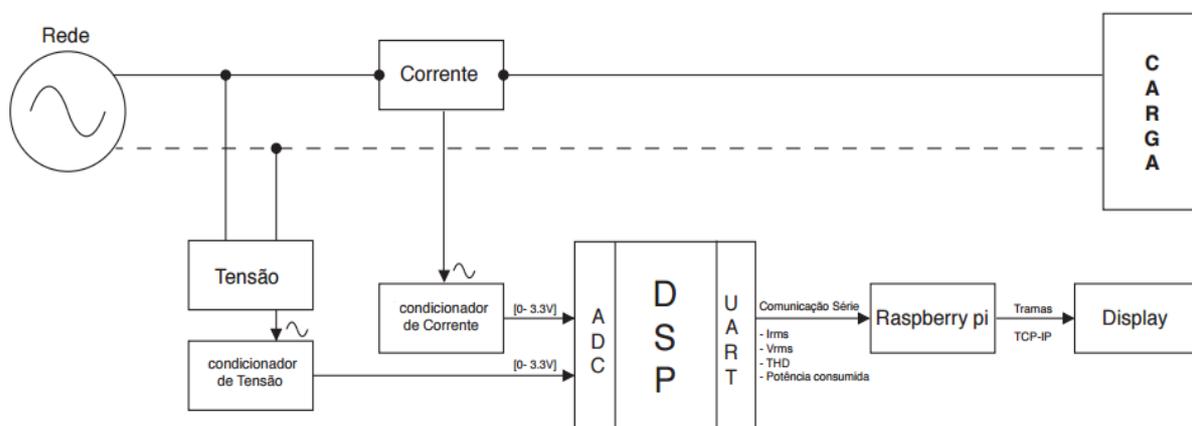


Figura 6-23 - Diagrama de blocos do sistema desenvolvido

7. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados. As cargas escolhidas foram selecionadas tendo em conta o facto de serem facilmente encontradas num sistema de baixa tensão, nomeadamente numa área residencial. As cargas utilizadas foram o aquecedor, ventoinha, computador, ecrã TFT, televisor e a máquina de lavar roupa. Foi ainda realizado um pequeno ensaio que possui como objetivo simular o comportamento de várias cargas a funcionar em conjunto.

Primeiramente, serão comparados os testes feitos com o CEM e o FLUKE 345; depois de completa essa comparação, serão demonstrados os testes feitos com o contador desenvolvido. É importante referir que todas as análises feitas com o FLUKE 345 terão uma corrente dez vezes maior, pois foram dadas 10 voltas à pinça do aparelho, o que faz com que haja uma maior resolução e, conseqüentemente, uma maior precisão nos resultados obtidos.

As plataformas de testes usadas para as comparações das leituras do CEM e do sistema desenvolvido com o FLUKE 345 podem ser vistas na figura 7.1.

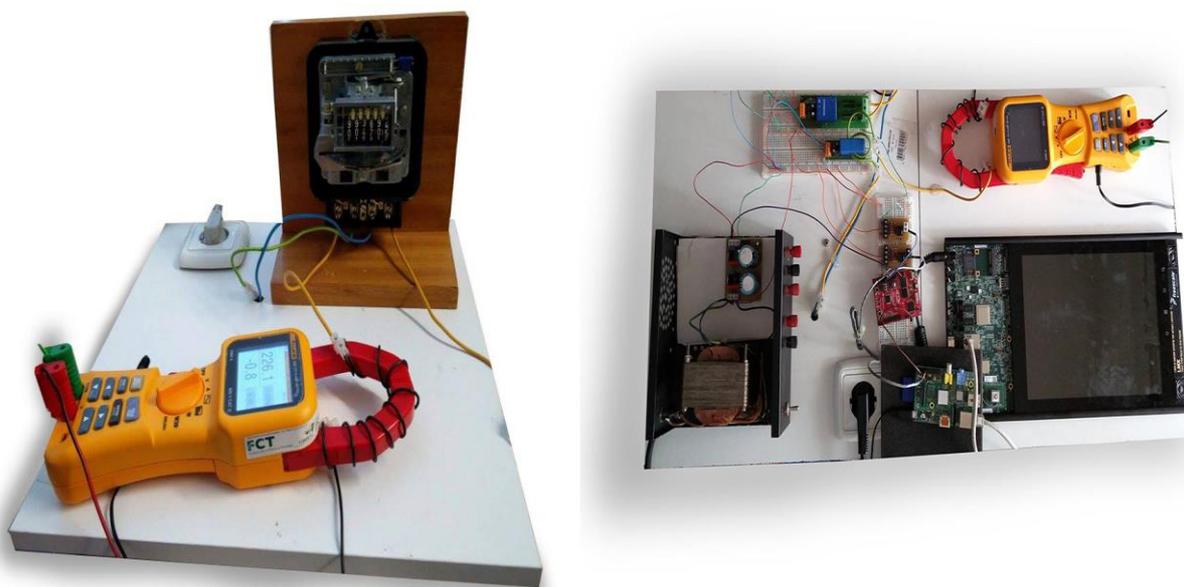


Figura 7-1 - Bancada de testes do CEM (esquerda) e bancada de testes do sistema desenvolvido (direita)

7.1 Ensaio Aquecedor

Como referido no capítulo 2.1, o CEM está preparado para fazer uma leitura de cargas lineares, o que não acontece atualmente, visto que aparecem cada vez mais cargas não lineares associadas à rede. Posto isto, começou-se por fazer um teste com um aquecedor, que representa uma carga resistiva, ou seja, uma carga linear. O aparelho utilizado nos ensaios possui uma potência nominal de 1500W e 6 níveis de aquecimento, neste teste foi utilizado o nível 5 e a sua duração decorreu em 5 minutos.

A figura 7.2 mostra o espectro do sinal de tensão, bem como o valor eficaz da tensão e sua percentagem de harmônicos.

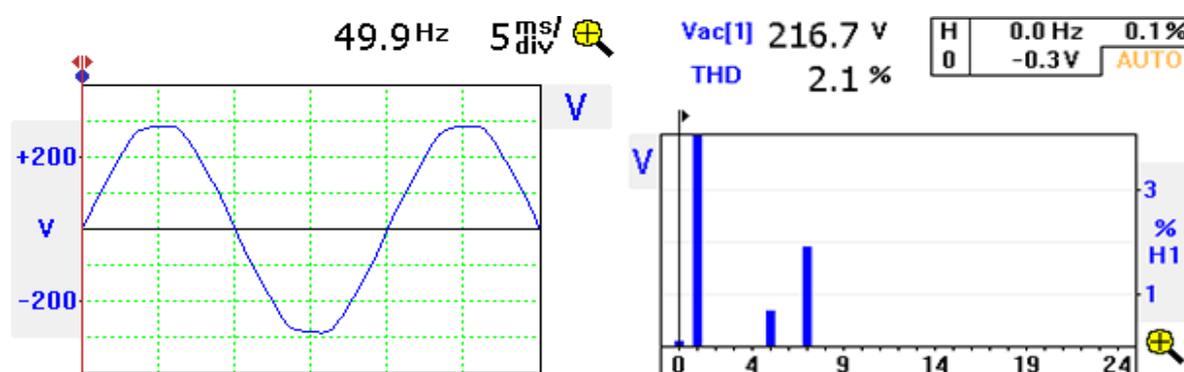


Figura 7-2 - Valores tensão do aquecedor

Através da análise da figura 7.2, é possível visualizar que a rede por si só já terá harmônicos de tensão 2,1%. Tal como na figura 7.2, na figura 7.3 estão representados os dados obtidos da leitura das correntes.

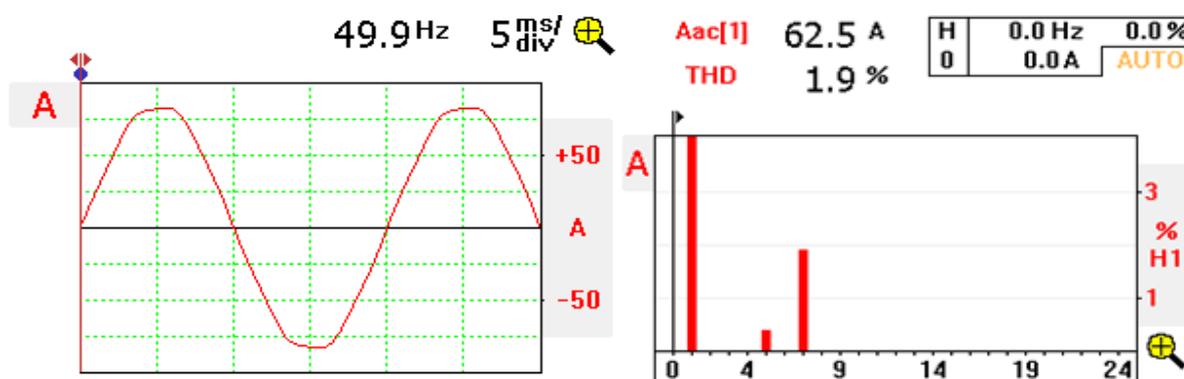


Figura 7-3 - Valores corrente do Aquecedor

Depois de analisados os dados provenientes da leitura das correntes e tensões da carga, procedeu-se à leitura do consumo do aquecedor. Tanto o CEM como o FLUKE 345 fizeram as medições do consumo em paralelo. O CEM, nesses 5 minutos, registou um total de voltas

do disco de 82. Fazendo a conversão para Wh , e sabendo que o CEM possui $720 \text{ rot}/kWh$, a potência consumida vem:

$$\frac{82.1000}{720} = 113,8(8)Wh \quad (7.1)$$

O FLUKE 345 registou uma potência consumida de $113,2 Wh$. A figura 7.4 apresenta os dados provenientes das leituras do consumo do FLUKE, o valor da potência consumida encontra-se com um valor dez vezes superior ao real, devido ao facto apresentado no capítulo 7 de se ter dado dez voltas em torno da pinça do FLUKE.

REC - LIVE		50.0 Hz
Run Time: 0d 0h 05m		
WHr	VAHr	V rms
1132	1132	217.3
VARHr	AHr	A rms
0	5.21	62.6

Figura 7-4 - Valores do consumo do FLUKE 345 do aquecedor

Fazendo assim uma comparação do consumo dos dois aparelhos e tendo em vista que o FLUKE 345 é o que mais se aproxima dos valores reais de consumo, obteve-se um erro de leitura do CEM de:

$$\frac{Valor_{CEM} - Valor_{FLUKE}}{Valor_{FLUKE}} \cdot 100 = \frac{113,9 - 113,2}{113,2} \cdot 100 = 0,618\% \quad (7.2)$$

Para a obtenção dos resultados a partir do sistema desenvolvido, o aquecedor foi posto no nível mais baixo, pois o acondicionamento do sinal de corrente foi calibrado para obtenção dos valores de corrente até três amperes. Assim, os resultados obtidos podem ser visualizados a partir da figura 7.5.



Figura 7-5 - Valores do aquecedor a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345

$$\frac{Valor_SISTEMA - Valor_FLUKE}{Valor_FLUKE} \cdot 100 = \frac{50,182 - 50}{50} \cdot 100 = 0,364\% \quad (7.3)$$

Conclusões

Sendo o aquecedor uma carga resistiva (carga linear), a forma de onda da corrente irá ser igual à onda que lhe deu origem. Como a onda de tensão contém alguma distorção, a onda de corrente também possuirá uma onda distorcida. A alimentação na Universidade do Minho, onde decorreu o ensaio, possui uma distorção na tensão que ronda os 2%, fazendo com que a onda de corrente também possua alguma distorção, embora mínima.

Como o CEM foi preparado para funcionar em condições sinusoidais, neste ensaio ele funciona corretamente, tal como espetável. Fazendo a comparação com os valores retirados do FLUKE, que é o aparelho que mais se aproxima dos valores reais, o erro do CEM é relativamente baixo, numa leitura de cinco minutos o seu erro foi de 0,618%.

Quanto aos valores do sistema desenvolvido, este ensaio foi realizado numa residência e por esse motivo o valor eficaz da tensão e o THD apresentam-se diferentes dos primeiros obtidos nos ensaios ao CEM. Os valores da potência consumida aproximam-se dos valores reais, inclusive consegue ter um erro abaixo do CEM. No que toca ao THD apresenta um valor ligeiramente superior ao obtido pelo FLUKE 345.

7.2 Ensaio Aquecedor com díodo

Fez-se um novo ensaio com o mesmo aquecedor, exatamente com as mesmas condições apresentadas no subcapítulo 7.1, mas adicionando-se um díodo à entrada da carga. Isto irá fazer com que haja uma maior distorção da onda.

A figura 7.6 mostra o espectro do sinal de tensão, bem como o valor eficaz da tensão e sua percentagem de harmônicos.

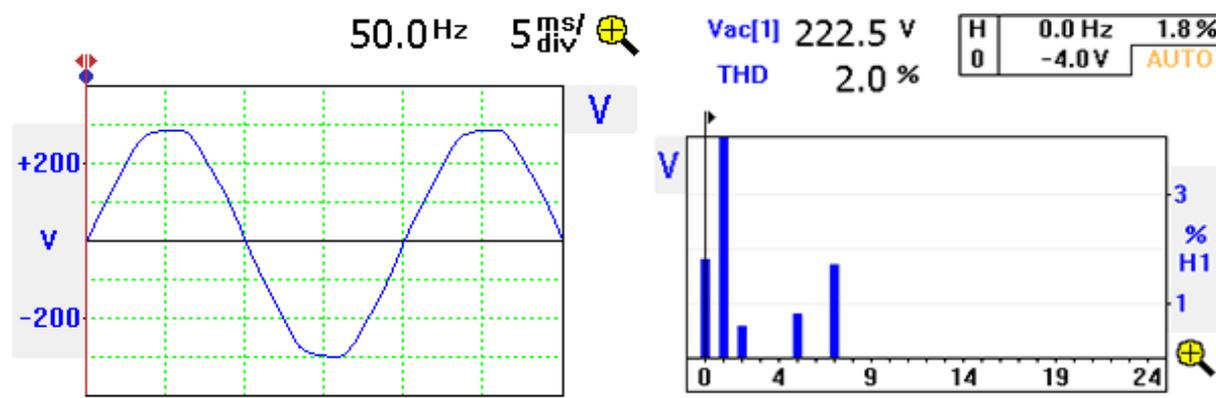


Figura 7-6 - Valores tensão aquecedor com díodo

Na figura 7.7, estão representados os dados obtidos da leitura das correntes. Com a aplicação do díodo retificou-se o sinal. Neste caso, a parte negativa da forma de onda da corrente foi cortada, o que conduziu a um aumento significativo da taxa de harmônicos.

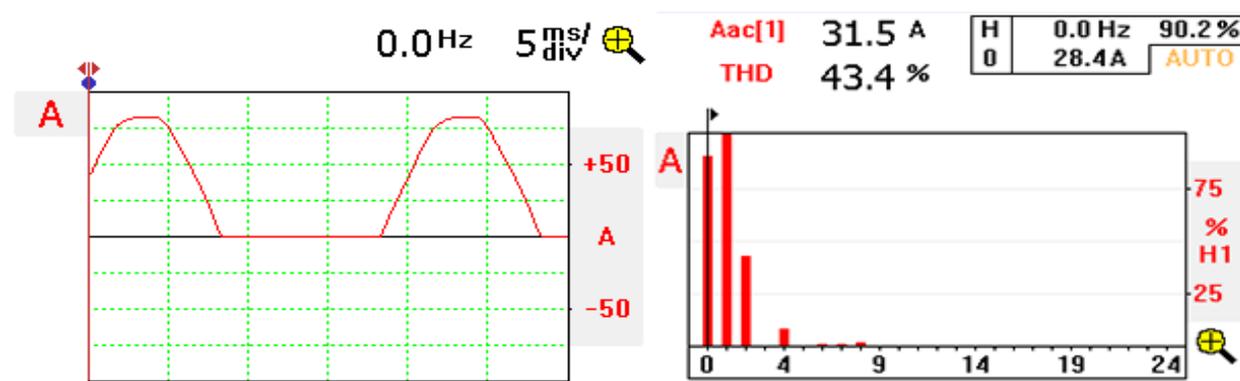


Figura 7-7 - Valores de Corrente aquecedor com díodo

Depois de analisados os dados provenientes da leitura das correntes e tensões da carga, procedeu-se à leitura do consumo do aquecedor. O CEM, nesses 5 minutos, registou um total de voltas do disco de 42,5 voltas. Fazendo a conversão para Wh , e sabendo que o CEM possui 720 rot/kWh , a potência consumida vem:

$$\frac{42,5.1000}{720} = 59 \text{ Wh} \quad (7.4)$$

O FLUKE 345 registou uma potência consumida de 57,3 Wh. A figura 7.8 apresenta os dados provenientes das leituras do consumo do FLUKE.

REC - LIVE		50.0 Hz
Run Time: 0d 0h 05m		
WHr	VAHr	V rms
573	825	222.4
VARHr	AHr	A rms
593	3.71	44.6

Figura 7-8 - Valores consumo aquecedor com díodo

Fazendo assim uma comparação do consumo dos dois aparelhos e tendo em vista que o FLUKE 345 é o que mais se aproxima dos valores reais de consumo, obteve-se um erro de leitura do CEM de:

$$\frac{Valor_CEM - Valor_FLUKE}{Valor_FLUKE} \cdot 100 = \frac{59 - 57,3}{57,3} \cdot 100 = 2,96\% \quad (7.5)$$

Para a obtenção dos resultados a partir do sistema desenvolvido, o aquecedor, apesar de ter um díodo que lhe reduz a corrente, foi novamente posto no nível mais baixo, pois o acondicionamento do sinal de corrente foi calibrado para obtenção dos valores de corrente até três amperes. Assim, os resultados obtidos podem ser visualizados a partir da figura 7.9.

	REC - LIVE		50.0 Hz
	Run Time: 0d 0h 05m		
	WHr	VAHr	V rms
	262	374	235.8
	VARHr	AHr	A rms
	267	1.58	18.82

Figura 7-9 - Valores do aquecedor com díodo a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345

$$\frac{Valor_SISTEMA - Valor_FLUKE}{Valor_FLUKE} \cdot 100 = \frac{26,45 - 26,2}{26,2} \cdot 100 = 0,97\% \quad (7.6)$$

Conclusões

O aquecedor com díodo é um bom teste para ser realizado, pois algumas cargas usadas no dia a dia num domicílio, podem apresentar este tipo de comportamento, como é o caso do secador, que, para reduzir a sua intensidade, provoca distorções na rede, tal como o apresentado neste teste.

Apesar do aquecedor ser uma carga resistiva, quando se aplica um díodo à entrada da carga, a onda de corrente irá ser retificada (retificador de meia onda), ou seja, a parte negativa fica a zero, tal como se pode verificar na figura 7.7.

Depois de realizado o teste, é possível observar que, apesar da taxa de distorção de corrente ser elevada (48%), o erro dado pela comparação entre o CEM e o FLUKE é mínimo. Isto acontece porque a corrente da fundamental é elevada, ou seja, embora o sistema possua uma taxa de distorção elevada, o fator que influenciará o erro será a corrente, fazendo com que a diferença seja menor e, conseqüentemente, a leitura do consumo por parte do CEM seja mais correta.

Quanto ao sistema desenvolvido, é importante referir que o ensaio foi realizado numa residência e por esse motivo o valor eficaz da tensão e o THD apresentam-se diferentes dos obtidos nos ensaios ao CEM. O sistema desenvolvido mostrou-se capaz de obter os valores da potência consumida com bastante precisão, aproximando-se dos valores obtidos pelo FLUKE 345. Quanto ao THD, os valores no FLUKE rondavam os 47%, ao passo que no sistema os valores rodam os 55%.

7.3 Ensaio de Ventoinha

A ventoinha utilizada nos ensaios possui uma potência nominal de 40W. Esta carga é caracterizada por ser um motor de baixa potência, sendo que possui três velocidades. Para efeito de estudo, procedeu-se à realização dos testes com as velocidades mínima e máxima. Isto porque, quando a ventoinha está a funcionar com a velocidade mínima, esta causará mais distorção do que quando se encontra na velocidade máxima. Quanto à duração dos testes, estes decorreram em 25 minutos.

- **Ventoinha na velocidade mínima obteve-se:**

Os valores eficazes tanto da corrente como da tensão, bem como o seu espectro e percentagem de harmônicos podem ser vistos a partir da análise da figura 7.10.

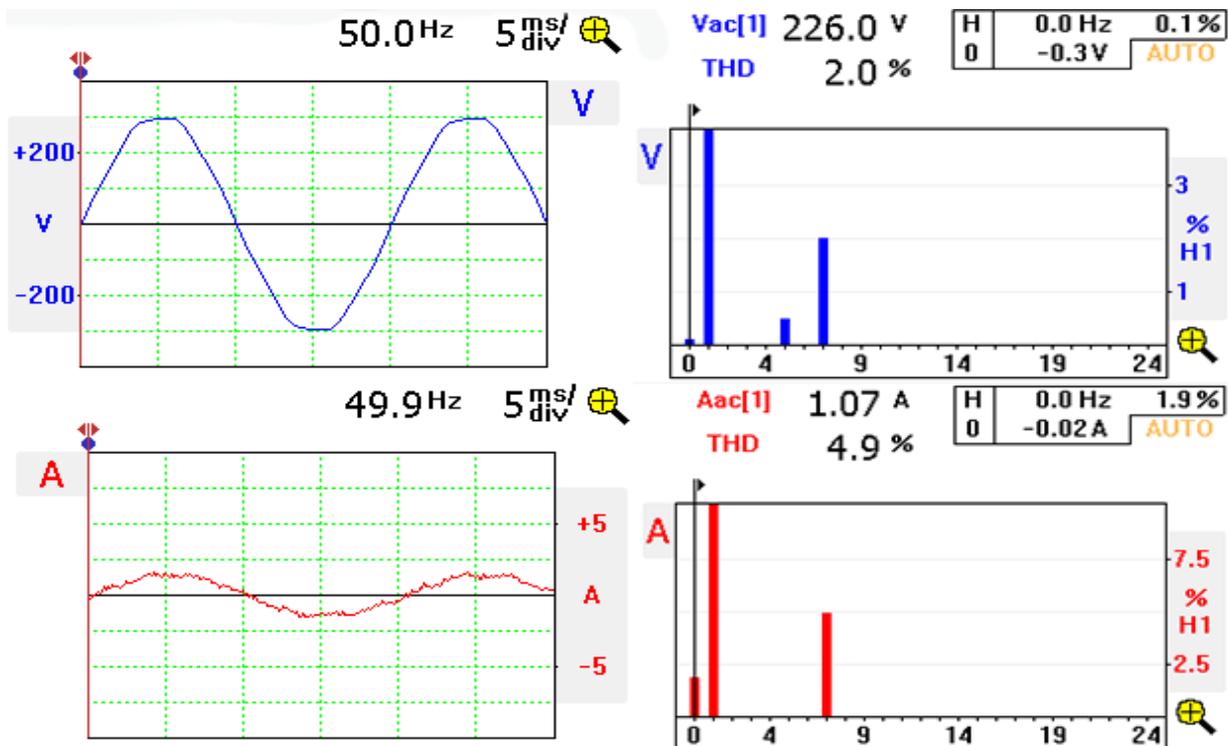


Figura 7-10 - Valores tensão e corrente ventoinha velocidade mínima

Quanto à leitura feita pelo CEM, em 25min, registou um total de voltas ao disco de 7.5. Fazendo a conversão, vem:

$$\frac{7,5 \cdot 1000}{720} = 10,42 \text{ Wh} \quad (7.7)$$

O FLUKE 345 registou uma potência consumida de 10,0 Wh. A figura 7.11 apresenta os dados provenientes das leituras do consumo do FLUKE.

REC - LIVE		49.9 Hz
Run Time: 0d 0h 25m		
WHr	VAHr	V rms
100	101	226.8
VARHr	AHr	A rms
-13	0.44	1.09

Figura 7-11 - Valores consumo velocidade mínima

Fazendo assim uma comparação do consumo dos dois aparelhos, obteve-se um erro de leitura do CEM de:

$$\frac{Valor_CEM - Valor_FLUKE}{Valor_FLUKE} \cdot 100 = \frac{10,41 - 10}{10} \cdot 100 = 4,1\% \quad (7.8)$$

Quanto aos resultados obtidos através do sistema desenvolvido, estes podem ser visualizados a partir da figura 7.12.



Figura 7-12 - Valores da ventoinha nível 1 a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345

$$\frac{Valor_SISTEMA - Valor_FLUKE}{Valor_FLUKE} \cdot 100 = \frac{10,49 - 10,2}{10,2} \cdot 100 = 2,9\% \quad (7.9)$$

- **Ventoinha na velocidade máxima:**

Os valores eficazes tanto da corrente como da tensão, bem como o seu espectro e percentagem de harmônicos podem ser vistos a partir da análise da figura 7.13

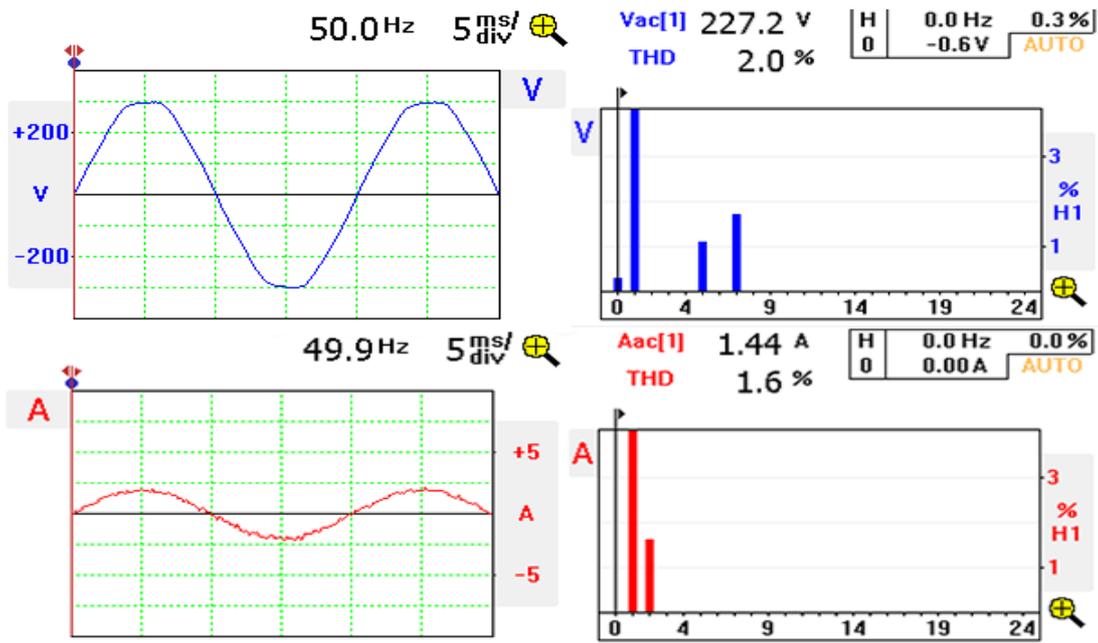


Figura 7-13 - Valores tensão e corrente ventoinha velocidade máxima

Quanto à leitura feita pelo CEM, em 25min, registou um total de voltas ao disco de 9.4. Fazendo a conversão, vem:

$$\frac{9,4 \cdot 1000}{720} = 13,05 \text{ Wh} \quad (7.10)$$

O FLUKE 345 registou uma potência consumida de 13,0 Wh. A figura 7.14 apresenta os dados provenientes das leituras do consumo do FLUKE.

REC - LIVE		49.9 Hz
Run Time: 0d 0h 25m		
WHr	VAHr	V rms
130	136	226.1
VARHr	AHr	A rms
38	0.60	1.43

Figura 7-14 - Valores consumo ventoinha velocidade máxima

Fazendo assim uma comparação do consumo dos dois aparelhos, obteve-se um erro de leitura do CEM de:

$$\frac{Valor_CEM - Valor_FLUKE}{Valor_FLUKE} \cdot 100 = \frac{13,05 - 13}{13} \cdot 100 = 0,42\% \quad (7.11)$$

Os valores apresentados pelo sistema desenvolvido, podem ser visualizados a partir da figura 7.15:

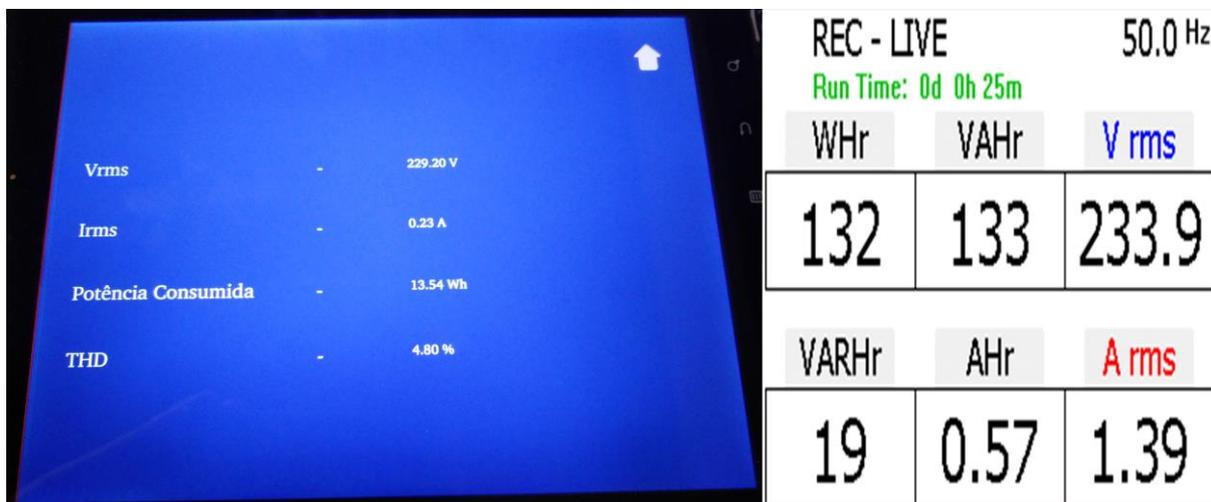


Figura 7-15 - Valores da ventoinha no nível 3 a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345

$$\frac{Valor_SISTEMA - Valor_FLUKE}{Valor_FLUKE} \cdot 100 = \frac{13,54 - 13,2}{13,2} \cdot 100 = 2,5\% \quad (7.12)$$

Conclusões

A ventoinha é uma carga linear, porém, tal como pode ser visto através dos ensaios, possui respostas diferentes consoante o nível de velocidade pretendido. Foram criados dois testes, um para a velocidade mínima e outro para a velocidade máxima.

Quando a ventoinha se encontra na velocidade mínima, há redução da sua velocidade, que provocará uma distorção na onda de corrente de 5%, fazendo com que o erro de leitura do CEM seja de 4.1%. No entanto, quando esta se encontra na velocidade máxima, a distorção é muito mais pequena, ficando-se pelos 1,6%, tornando-se nestas condições mais próximo de uma carga linear. Fazendo a comparação dos resultados do CEM e do FLUKE, o erro foi de 0,42%.

Os resultados do sistema desenvolvido apresentaram um erro de 2,9% e 2,6%, para as velocidades mínima e máxima, respetivamente. Apesar de serem erros baixos, o sistema desenvolvido tem um erro maior do que o obtido pelo CEM, na velocidade máxima, o que não era pretendido. No entanto, quando a ventoinha se encontra na velocidade mínima, o sistema desenvolvido possui um erro muito inferior à do obtido pelo CEM.

7.4 Ensaio de Computador Portátil

Como o CEM está preparado para fazer uma leitura de energia em regime sinusoidal com cargas lineares, torna-se necessário recorrer a testes de cargas não lineares usadas diariamente numa rede doméstica. Posto isto, começou-se por efetuar um teste com um computador portátil, que representa uma carga não linear. O portátil usado é o LG R510 e o teste decorreu em 5 minutos.

A figura 7.16 mostra o espectro do sinal de tensão, bem como o valor eficaz da tensão e sua percentagem de harmónicos.

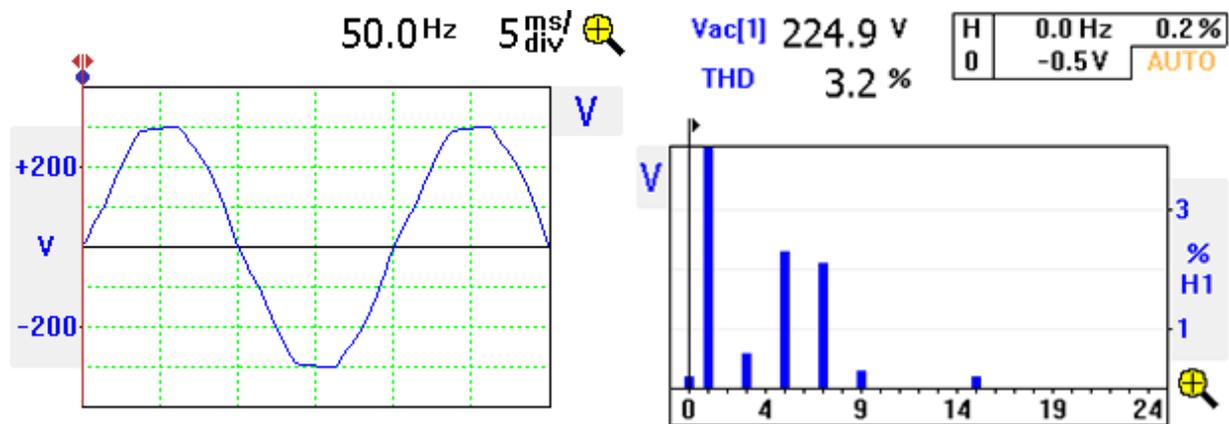


Figura 7-16 - Valores tensão de computador portátil

Na figura 7.17, estão representados os dados obtidos da leitura das correntes. Contrariamente ao que se passava com os testes anteriores, aqui a forma de onda da corrente é completamente diferente da forma de onda que a originou.

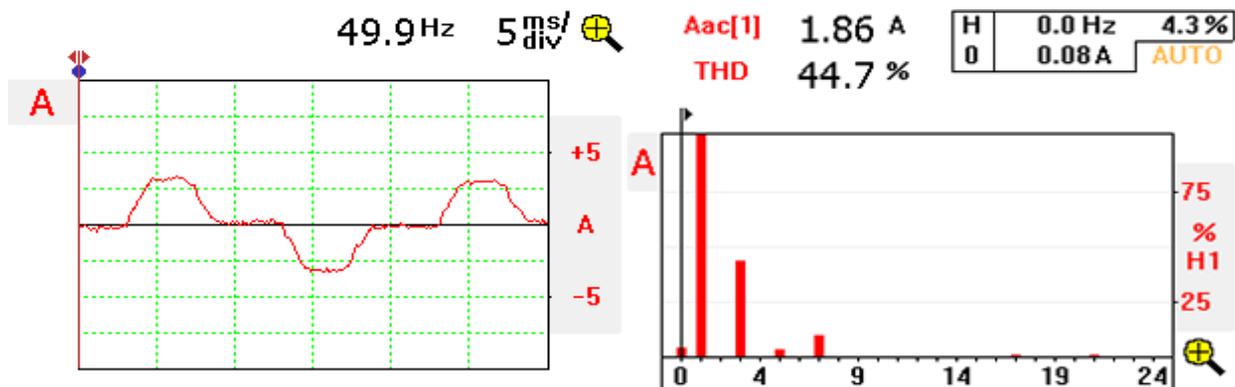


Figura 7-17 - Valores corrente do computador portátil

Quanto à leitura feita pelo CEM, em 5 minutos, registou um total de voltas ao disco de 2.5. Fazendo a conversão, vem:

$$\frac{2,5 \cdot 1000}{720} = 3,47 \text{ Wh} \quad (7.13)$$

O FLUKE 345 registou uma potência consumida de 3,3 Wh. A figura 7.18 apresenta os dados provenientes das leituras do consumo do FLUKE.

REC - LIVE		50.0 Hz
Run Time: 0d 0h 05m		
WHR	VAHr	V rms
33	38	230.5
VARHr	AHr	A rms
-17	0.16	1.88

Figura 7-18 - Consumos computador portátil

Fazendo assim uma comparação do consumo dos dois aparelhos, obteve-se um erro de leitura do CEM de:

$$\frac{\text{Valor}_{CEM} - \text{Valor}_{FLUKE}}{\text{Valor}_{FLUKE}} \cdot 100 = \frac{3,47 - 3,3}{3,3} \cdot 100 = 5,2\% \quad (7.14)$$

Os valores obtidos pelo sistema desenvolvido podem ser vistos na figura 7.19.

REC - LIVE		50.0 Hz
Run Time: 0d 0h 05m		
WHR	VAHr	V rms
31	38	236.7
VARHr	AHr	A rms
-22	0.16	1.76

Vrms	-	238.02 V
Irms	-	0.22 A
Potência Consumida	-	3.19 Wh
THD	-	63.90 %

Figura 7-19 - Valores do computador portátil a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345

$$\frac{\text{Valor}_{SISTEMA} - \text{Valor}_{FLUKE}}{\text{Valor}_{FLUKE}} \cdot 100 = \frac{3,19 - 3,1}{3,1} \cdot 100 = 2,9\% \quad (7.15)$$

Conclusões

Tal como já foi referido, o portátil é uma carga não linear, ou seja, o CEM não está preparado para funcionar com este tipo de cargas. Foi necessário realizar este ensaio, pois o portátil é um aparelho muito usado pela maior parte das pessoas em todos os domicílios, de forma a verificar o nível de erro do CEM quando exposto a estas condições.

O ensaio foi realizado numa rede residencial e por isso a distorção da onda de tensão (3,2%) é ligeiramente maior que a da rede da Universidade (2,1%). Como esperado, depois de uma leitura de cinco minutos, o erro apresentado pelo CEM é maior nestes casos, com uma distorção da onda da corrente de 44,7% e, na onda de tensão de 3,2%, o erro do CEM foi de 5,2%.

Quanto ao sistema desenvolvido, mostrou-se capaz de obter os valores da potência consumida com bastante precisão, aproximando-se dos valores obtidos pelo FLUKE 345, sendo que o erro obtido na leitura da potência consumida, neste ensaio, foi de 2,8%, encontrando-se muito abaixo do obtido pelo CEM. Quanto ao THD, os valores no FLUKE rondavam os 51%, ao passo que no sistema os valores rodam os 64%.

7.5 Ensaio com ecrã TFT

Tal como o portátil, o ecrã TFT é uma carga não linear usada diariamente numa rede doméstica. O ecrã TFT usado é o ACER AL1713 e o ensaio decorreu em 5 minutos.

A figura 7.20 mostra o espectro do sinal de tensão, bem como o valor eficaz da tensão e sua percentagem de harmónicos. É importante referir que este teste foi realizado na rede doméstica e não na universidade, assim o valor eficaz da tensão é ligeiramente superior aos obtidos nos ensaios anteriores.

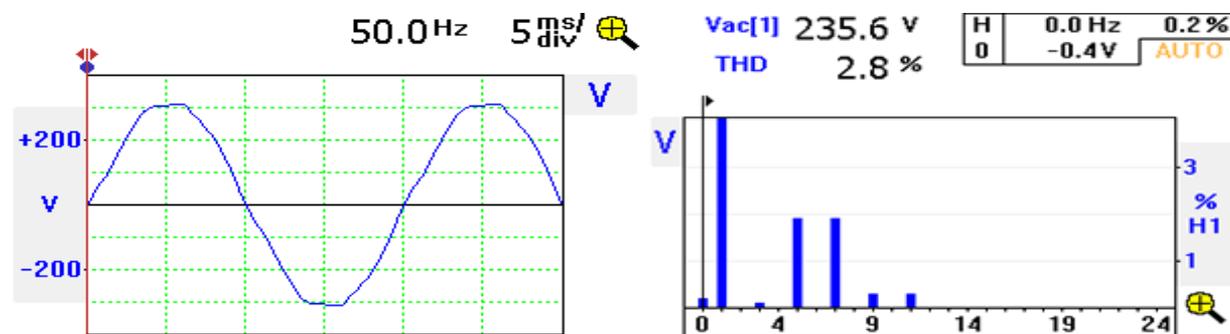


Figura 7-20 - Valores tensão ecrã TFT

Na figura 7.21, estão representados os dados obtidos da leitura das correntes. Com uma taxa de harmônicos elevada, é possível verificar que a forma de onda da corrente é diferente da forma de onda que lhe deu origem, ainda mais distorcida do que a observada no teste do portátil.

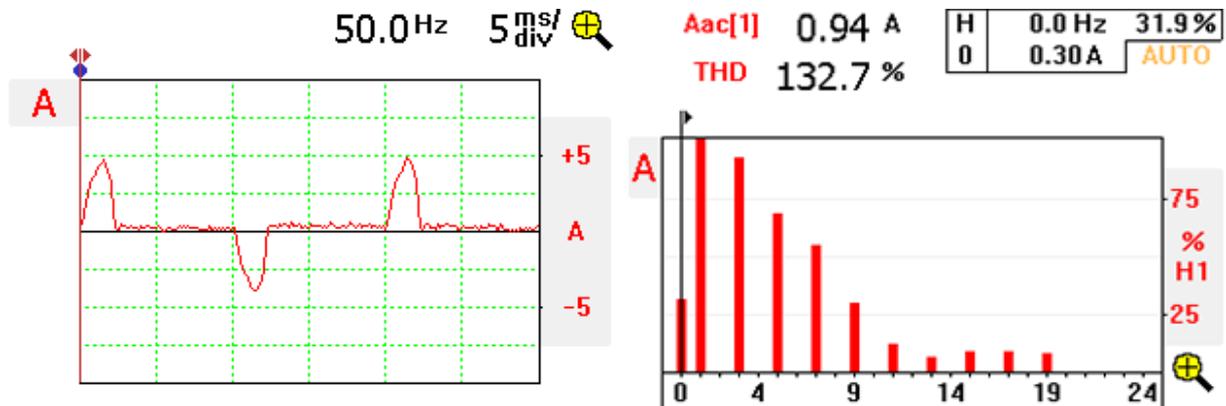


Figura 7-21 - Valores corrente ecrã TFT

Quanto à leitura feita pelo CEM, em 5 minutos, registou um total de voltas ao disco de 1.5. Fazendo a conversão, vem:

$$\frac{1,5 \cdot 1000}{720} = 2,083 \text{ Wh} \quad (7.16)$$

O FLUKE 345 registou uma potência consumida de 1,9 Wh. A figura 7.22 apresenta os dados provenientes das leituras do consumo do FLUKE.

REC - LIVE		49.9 Hz
Run Time: 0d 0h 05m		
WHr	VAHr	V rms
19	33	237.9
VARHr	AHr	A rms
22	0.14	1.69

Figura 7-22 - Consumo ecrã TFT

Fazendo assim uma comparação do consumo dos dois aparelhos, obteve-se um erro de leitura do CEM de:

$$\frac{Valor_CEM - Valor_FLUKE}{Valor_FLUKE} \cdot 100 = \frac{2,083 - 1,9}{1,9} \cdot 100 = 9,6\% \quad (7.17)$$

Os valores obtidos pelo sistema desenvolvido encontram-se representados na seguinte figura 7.22.



Figura 7-23 - Valores do ecrã TFT a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345

$$\frac{Valor_SISTEMA - Valor_FLUKE}{Valor_FLUKE} \cdot 100 = \frac{1,86 - 1,8}{1,8} \cdot 100 = 3,1\% \quad (7.18)$$

Conclusões

Tal como o portátil, o ecrã TFT é uma carga não linear. O ecrã TFT foi sujeito às mesmas condições das do portátil, numa rede residencial. Como esperado, o erro apresentado pelo CEM é grande, com uma distorção da onda da corrente de 132,7% e, na onda de tensão de 2,8%, o erro do CEM foi de 9,6%.

Quanto ao sistema desenvolvido, os erros obtidos continuam a ser relativamente baixos, quando comparados aos obtidos pelo CEM. Já no que toca ao THD o sistema apresenta um valor a rondar os 170% de harmónicos, ou seja, cerca de 15% mais harmónicos que o FLUKE 345.

7.6 Ensaio com Televisor

O televisor é outro aparelho dos mais utilizados na rede doméstica, existindo, por vezes, mais do que um aparelho ligado por habitação. Assim, é importante fazer o teste para verificação dos consumos deste aparelho. A televisão caracteriza-se por ser uma carga não linear. A televisão usada é a SONY KLV-S40A10E e o ensaio decorreu em 5 minutos.

A figura 7.24 mostra o espectro do sinal de tensão, bem como o valor eficaz da tensão e sua percentagem de harmónicos. Tal como referido no capítulo 7.5, os testes foram realizados na rede doméstica.

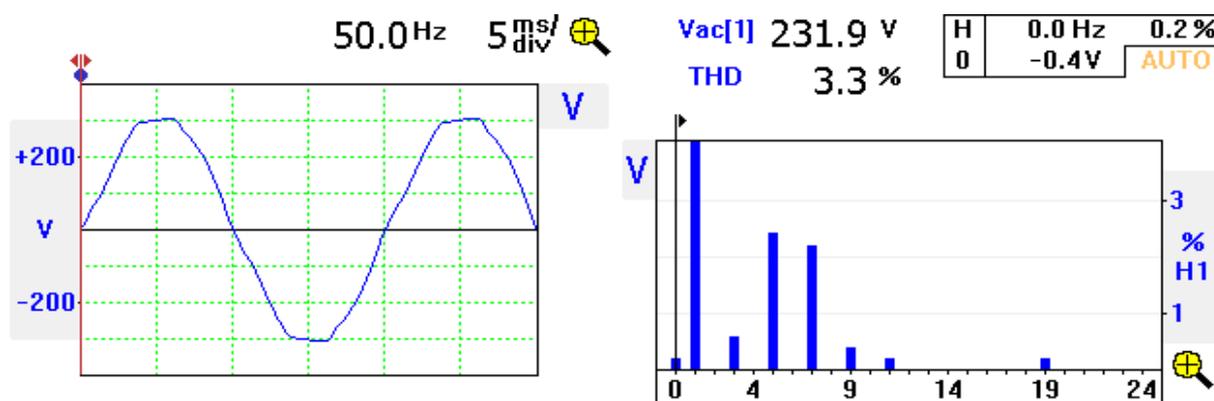


Figura 7-24 - Valores tensão televisor

Na figura 7.25, estão representados os dados obtidos da leitura das correntes. Este aparelho é uma boa carga para ser estudada, pois, para além de possuir uma alta taxa harmónica, necessita de mais corrente do que os testes feitos com o portátil e com o ecrã TFT.

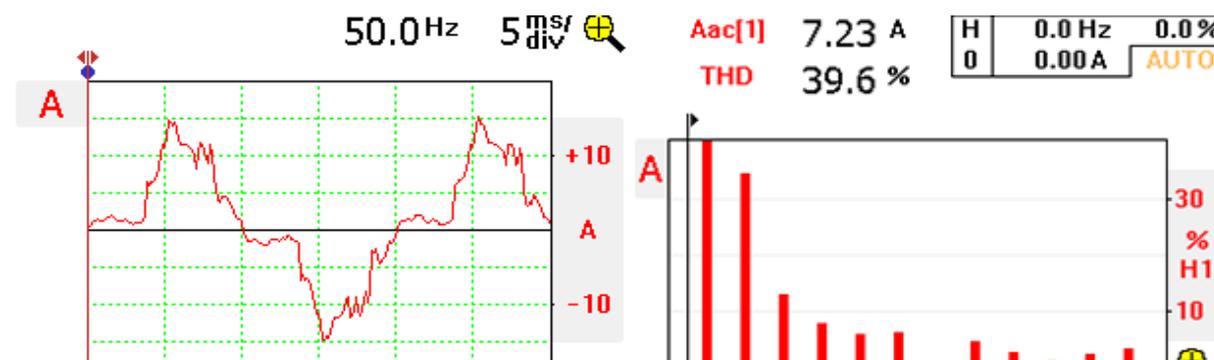


Figura 7-25 - valores de corrente televisor

Quanto à leitura feita pelo CEM, em 5 minutos, registou um total de voltas ao disco de 10. Fazendo a conversão, vem:

$$\frac{10.1000}{720} = 13,9 Wh \quad (7.19)$$

O FLUKE 345 registou uma potência consumida de 13,4 Wh. A figura 7.26 apresenta os dados provenientes das leituras do consumo do FLUKE.

REC - LIVE		50.0 Hz
Run Time: 0d 0h 05m		
WHr	VAHr	V rms
134	152	231.4
VARHr	AHr	A rms
-72	0.65	7.89

Figura 7-26 - Consumos televisor

Fazendo assim uma comparação do consumo dos dois aparelhos, obteve-se um erro de leitura do CEM de:

$$\frac{Valor_CEM - Valor_FLUKE}{Valor_FLUKE} \cdot 100 = \frac{13,9 - 13,4}{13,4} \cdot 100 = 3,65\% \quad (7.20)$$

Quanto ao sistema desenvolvido, os valores podem ser vistos através da análise da figura 7.27.

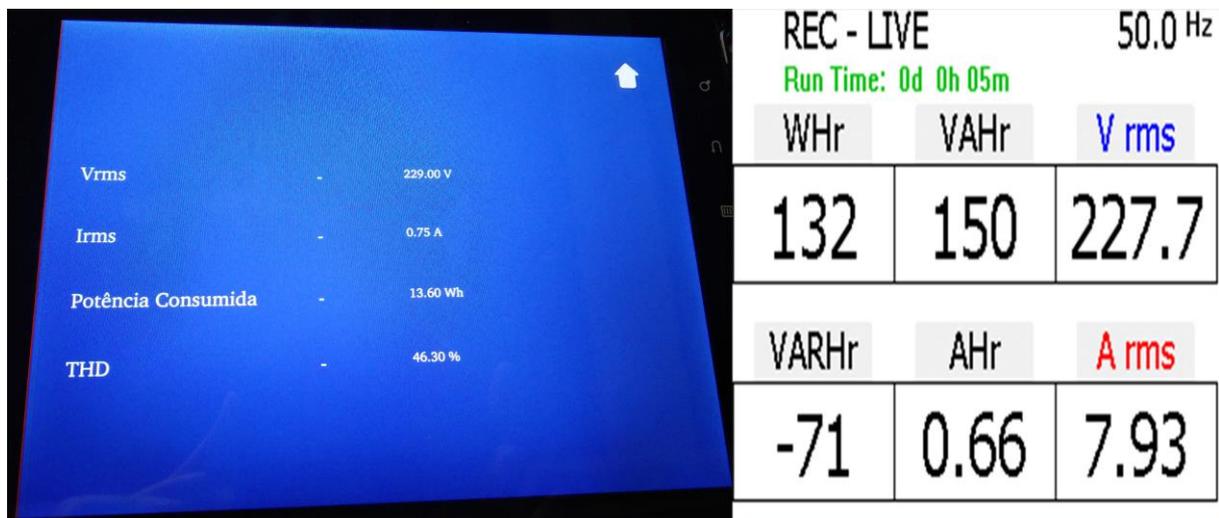


Figura 7-27 - Valores do televisor a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345

$$\frac{Valor_SISTEMA - Valor_FLUKE}{Valor_FLUKE} \cdot 100 = \frac{13,60 - 13,2}{13,2} \cdot 100 = 3\% \quad (7.21)$$

Conclusões

A televisão é uma carga não linear. É essencial realizar este ensaio, pois este eletrodoméstico é usado em todas as habitações e por isso é importante fazer a verificação do nível de erro do CEM quando exposto a esta carga.

O ensaio foi realizado numa rede residencial e por isso a distorção da onda de tensão é de 3,3%. Depois de realizada a leitura de cinco minutos, com uma distorção da onda da corrente de 39,6% e na onda de tensão de 3,3%, o erro do CEM foi de 3,65%. Torna-se evidente que, embora a televisão possua uma taxa de distorção muito próxima à do portátil, o erro do CEM é bastante menor. Isto acontece porque a corrente fundamental da televisão é superior à do portátil, fazendo com que o erro do CEM seja menor. Quanto ao sistema desenvolvido, os erros obtidos continuam a ser relativamente baixos, quando comparados aos obtidos pelo CEM.

7.7 Ensaio com três cargas

Neste ensaio procedeu-se à implementação da alimentação de três cargas em conjunto, uma com baixo THD e duas com alto THD. As cargas utilizadas foram o computador portátil, o ecrã TFT e o aquecedor. Este ensaio possui como objetivo efetuar uma aproximação ao cenário que se encontra num ambiente residencial.

A figura 7.32 mostra os espectros do sinal de tensão e de corrente, bem como os seus valores eficazes e sua percentagem de harmônicos.

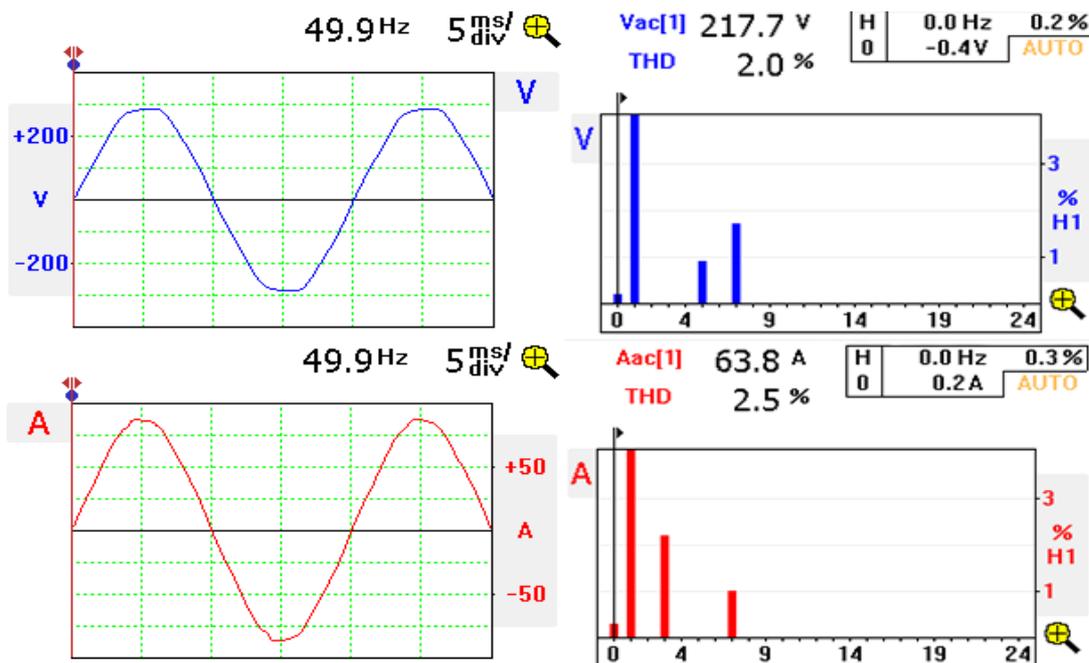


Figura 7-28 - Valores tensão e corrente das três cargas em conjunto

Através da análise da figura 7.32, é possível observar que, embora o conjunto possua duas cargas não lineares a injetar harmônicos no sistema, a carga resistiva, por ter uma potência muito superior, faz com que o THD final não seja muito elevado.

Quanto à leitura feita pelo CEM, em 5 minutos, registou um total de voltas ao disco de 85,5. Fazendo a conversão, vem:

$$\frac{85,5 \cdot 1000}{720} = 118,75 \text{ Wh} \quad (7.22)$$

O FLUKE 345 registou uma potência consumida de 116,6 Wh. A figura 7.33 apresenta os dados provenientes das leituras do consumo do FLUKE.

REC - LIVE		50.0 Hz
Run Time: 0d 0h 05m		
WHr	VAHr	V rms
1166	1166	219.3
VARHr	AHr	A rms
-1	5.33	63.9

Figura 7-29 - Consumo três cargas em conjunto

Fazendo assim uma comparação do consumo dos dois aparelhos, obteve-se um erro de leitura do CEM de:

$$\frac{\text{Valor}_{CEM} - \text{Valor}_{FLUKE}}{\text{Valor}_{FLUKE}} \cdot 100 = \frac{118,75 - 116,6}{116,6} \cdot 100 = 1,84\% \quad (7.23)$$

Quanto aos valores obtidos pelo sistema desenvolvido, estes podem ser analisados através da figura 7.34.

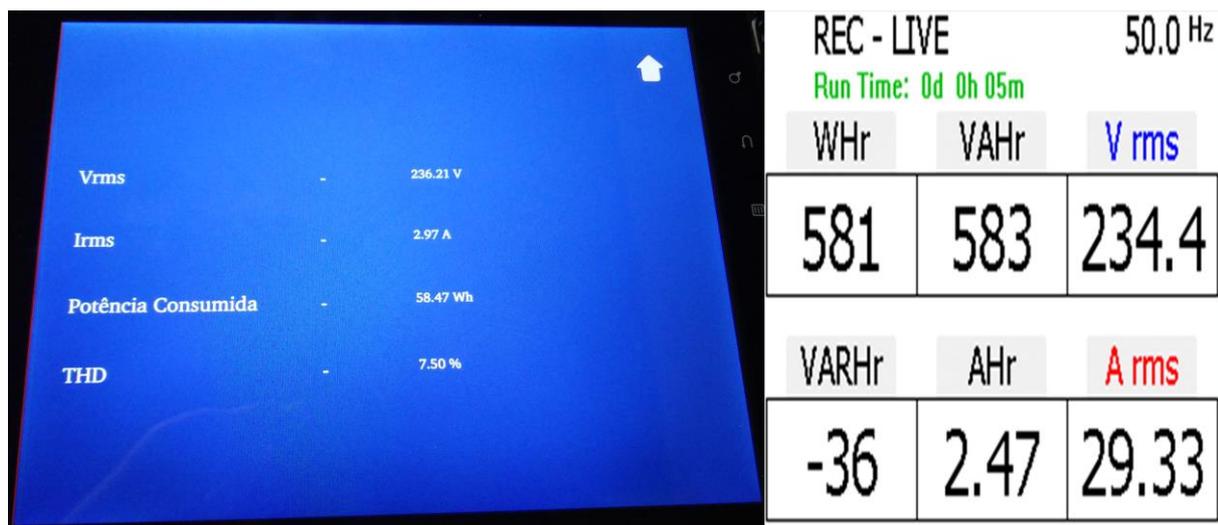


Figura 7-30 - Valores das três cargas a partir do sistema desenvolvido e FLUKE 345

$$\frac{Valor_SISTEMA - Valor_FLUKE}{Valor_FLUKE} \cdot 100 = \frac{58,47 - 58,1}{58,1} \cdot 100 = 0,635\% \quad (7.24)$$

Conclusões

Depois de analisadas algumas cargas lineares e não lineares, tornou-se evidente que o CEM é afetado pela distorção, mas, se a corrente fundamental fosse maior, o erro iria ser menor. Posto isto, era fundamental fazer um teste onde fossem alimentadas três cargas, duas das que possuíam maior erro no CEM (cargas não lineares), o portátil e o ecrã TFT, e outra que fosse das que possuía menos erro (carga resistiva), o aquecedor.

Depois de realizada a leitura de cinco minutos, é possível verificar que, apesar do sistema possuir duas cargas não lineares, a distorção da corrente é relativamente baixa (2,5%). Tendo o portátil uma distorção de 44,7% e o ecrã TFT de 132,7%, o THD final aproxima-se da distorção do aquecedor. Posto isto, o erro do CEM foi de 1,6%, sendo somente mais 1% do que o verificável individualmente com o aquecedor.

Neste sistema de três cargas, o sistema comportar-se-á quase como uma carga resistiva, isto acontece porque o aquecedor tem uma corrente maior que os outros dois aparelhos e assim os dados obtidos tanto do FLUKE como do CEM assemelham-se aos resultados obtidos do aquecedor.

Tal como já foi referido nos subcapítulos 7.1 e 7.2, o aquecedor foi posto no nível mínimo para a corrente não exceder os três amperes, como consequência o consumo irá ser menor. Os

valores obtidos através do sistema apresentam uma boa precisão, sendo que o erro é relativamente baixo (0,635%), encontrando-se abaixo do CEM.

Simultaneamente, os valores do THD (7,5%) também se apresentam muito próximos dos valores obtidos pelo FLUKE 345 (5,3%).

7.8 Discussão de Resultados

Numa primeira análise, seria de esperar que, quanto maior fosse o THD, maior seria o erro associado por parte da medição do CEM, quando comparado com a medição do FLUKE, contudo tal não se verificou.

Tabela 7-1- Leitura dos Ensaios Realizados

Aparelho	CEM (Wh)	Erro	FLUKE (Wh)	THD (%)	Sistema Desenvolvido (Wh)	THD (%)	Erro	FLUKE (Wh)
Aquecedor	113.9	0.618%	113.2	2.5	50.18	3.82	0.364%	50
Aquecedor com diodo	59	2.96%	57.3	46.6	26.45	55	0.97%	26.2
Ventoinha Velocidade mínima	10.42	4.1%	10.0	7.6	10.49	14.20	2.9%	10.2
Ventoinha Velocidade máxima	13.05	0.42%	13.0	2.7	13.54	4.8	2.6%	13.2
Computador	3.47	5.2%	3.3	55	3.19	63.9	2.8%	3.1
Ecrã TFT	2.083	9.6%	1.9	155	1.86	171.02	3.1%	1.8
Televisor	13.9	3.65 %	13.4	42.4	13.60	46.3	3%	13.2
Três cargas	118.75	1.84%	116.66	3.5	58.47	7.5	0.635%	58.1

A leitura do portátil gerou um erro no CEM de 5,2%, por sua vez a leitura da televisão gerou um erro de 3,6%. Embora o portátil e a televisão possuam praticamente a mesma distorção de corrente, os erros das leituras são bem mais evidentes no portátil. Assim, conclui-se que, apesar destas cargas não lineares possuírem uma distorção semelhante, o que mais influenciará o CEM, será a corrente da fundamental, ou seja, se encontrarmos um sistema com um THD muito alto, caso a corrente da fundamental seja elevada, o erro de leitura do CEM irá ser mais baixo.

Depois de analisar o comportamento das cargas não lineares e os efeitos do THD no CEM, juntou-se três cargas, duas não lineares e uma linear. Apesar das cargas não lineares apresentarem uma grande distorção harmônica, quando é aplicado uma carga resistiva (aquecedor), tanto o THD como o erro irão baixar.

Quanto ao sistema desenvolvido para esta dissertação, os resultados demonstraram que em quase todos os ensaios o sistema é bastante mais preciso que o CEM. Por se tratar de um sistema digital, os erros dependem da resolução dos sensores e da codificação, neste caso, os erros obtidos são influenciados pelo parâmetro da corrente, ou seja, quanto mais baixa for a corrente mais evidente fica o erro. Isto acontece, devido à existência de um ruído na alimentação do sistema, que, embora seja pequeno, quando afetado pela resolução (condicionadores + código) dos sensores, este pode atingir mais 10V que o valor original.

8. CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

Esta dissertação tem como principais objetivos o estudo do efeito dos harmónicos nos CEM e o seu comportamento quando estes se encontram afetados por este problema de qualidade de energia elétrica, bem como a implementação de um sistema de contagem de energia de baixo custo para a rede de baixa tensão. Conforme esperado, a distorção harmónica afeta o funcionamento do CEM.

Estes aparelhos foram calibrados para o funcionamento em condições sinusoidais, no que toca à corrente e à tensão, como já foi referido no subcapítulo 2.1. Quando esse é o caso, eles provaram ser capazes de efetuar as medições com um erro bastante reduzido. Ficou assim comprovado que estes aparelhos não são indicados para registo dos consumos quando estão na presença de cargas não lineares.

De salientar o facto do mau funcionamento em condições não sinusoidais não ser o motivo mais forte para a mudança que atualmente decorre, mas o crescimento da micro-geração. A instalação de contadores digitais a nível global abrirá ainda mais as portas às redes inteligentes, potenciando assim uma geração responsável e com custos competitivos.

Este trabalho tem como objeto de estudo o desenvolvimento de um sistema capaz de fazer a medição do consumo e dos harmónicos presentes numa rede doméstica.

Através dos estudos realizados nesta dissertação, é possível verificar que o consumidor consome mais do que o que devia, consequentemente paga mais energia do que aquela que as suas cargas na verdade consomem. Este é um problema que ficou espelhado pelo erro de contagem do CEM ter sido uma realidade em todos os ensaios. Assim torna-se evidente que se deve fazer a migração para contadores digitais por serem mais precisos e, consequentemente apresentarem um erro muito mais reduzido que os CEM, tal como pode ser observado através do comportamento apresentado pelo sistema desenvolvido.

Este sistema ainda se encontra numa fase inicial de desenvolvimento, embora tenha obtido valores satisfatórios. Poderiam ser feitas algumas alterações de forma a tornar-se ainda mais preciso e compacto. No sistema desenvolvido poderiam ser feitas algumas melhorias ao nível do *Software* e do *Hardware*.

Ao nível do *Software*, existe a possibilidade de atribuir mais funções ao projeto tais como: fazer a comunicação com um centro de dados (empresa reguladora), facilitando a integração com as redes inteligentes; fazer um registo de tudo o que acontece na rede doméstica,

registando todos os problemas de qualidade da energia; permitir o acesso ao dispositivo pelo consumidor final através de um dispositivo móvel.

Ao nível do *Hardware*, é possível melhorar a fonte de alimentação, de forma a ser menos suscetível a ruídos e a variações na tensão de saída. É possível fazer com que o sistema desenvolvido seja mais pequeno e compacto, ou seja, juntar todos os componentes numa única placa. Simultaneamente, deve-se proceder à mudança do DPS por outro melhor e com mais capacidade, pois o atual DPS revelou ter pouca capacidade de armazenamento de código chegando mesmo a ter problemas de espaço.

Sugestões de trabalho futuro

Quanto ao trabalho futuro, seria interessante fazer a verificação dos efeitos da distorção no CEM através do uso de cargas de maior potência. Poder-se-ia também realizar testes a harmónicos isolados, sendo necessário um gerador de harmónicos. Caso esta tarefa seja realizada, será possível verificar a influência de cada harmónico individualmente nos CEM e quais seriam os harmónicos que mais contribuiriam para aumentar os erros de leitura.

Fica por realizar uma análise completa de todos os harmónicos individualmente no sistema, ou seja, verificar a amplitude de todos os harmónicos presentes no sistema, para isso seria necessário fazer uma análise da transformada de *Fourier*. Também seria interessante fazer com que todas as funções do menu do projeto funcionassem (Relógio, Registo de dados e Estimativa do Custo), de forma a aproximar o sistema a um contador inteligente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EDP, "Distribuição de electricidade" [Online]. Disponível:
<https://www.edp.pt/pt/aedp/unidadesdenegocio/distribuicaodeelectricidade/Pages/DistribuiçãooPT.aspx>, [Acedido: 3 Março 2015]
- [2] PORDATA, "Energia eléctrica em Portugal" [Online]. Disponível:
<http://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+electrica+total+e+por+tipo+de+consumo-1124>, [Acedido: 3 Março 2015]
- [3] Wikipedia, "Medidor da energia eléctrica" [Online]. Disponível:
http://pt.wikipedia.org/wiki/Medidor_de_energia_eléctrica [Acedido 17 Janeiro 2015]
- [4] A.A.Hossam-Eldin e R.M.Hasan, "Study of the Effect of Harmonics on Measurements of the Energy Meters, The Eleventh International Middle East Power Systems Conference", El-Minia, 2006, pp.547-550.
- [4] Ferraris, G. Demonstrating the operating principle of an AC power meter, 2–5.
- [5] A. Baggini, Power Quality Handbook, A. Baggini, Ed. John Wiley & Sons Ltd, 2008.
- [6] EDP, "Contadores Híbridos" [Online] Disponível:
<https://energia.edp.pt/particulares/apoio-cliente/contadores-eletricidade/hibrido/bruno-janz/> ,
[Acedido: 26 Agosto 2015]
- [7] KEMA - Energy Consulting. (2012). Estudo sobre contadores inteligentes de electricidade e de gás natural Relatório 1E/G: Situação actual e experiência com projectos-piloto em Portugal, 1–71.
- [8] Intermunicipal, C. (2015). Workshop “ Smart Metering .”
- [9] EU Commission Task Force for Smart Grids Expert Group 1 : Functionalities of smart grids and smart meters Final Deliverable. (2010). *Group*, (December), 1–69.
- [10] SmatGrid, "Funções", [Online] Disponível:
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Smart_Grid_Function_Diagram.png [Acedido: 1 Setembro 2015]
- [11] Solutions.3M, "SmatGrid" [Online] Disponível:
http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_EU/SmartGrid/EU-Smart-Grid/ , [Acedido: 1 Setembro 2015]

- [12] EDP, "InovGrid" [Online] Disponível:
<http://www.edpdistribuicao.pt/pt/rede/InovGrid/Pages/InovGrid.aspx> , [Acedido: 4 Maio 2015]
- [13] Simão, T., Boucinha, M., Rodrigues, A., Nunes, V., & Pereira, P. (2013). 22 nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm , 10-13 June 2013 Paper 0743 THE NEW PARADIGM OF METERING IN PORTUGAL 22 nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm , 10-13 June 2013 Paper 0743 Consumer / Produce, (1314), 10–13.
- [14] Melo, N., Prata, R., Goncalves, R., & Mira, F. (2009). Microgeneration in Portugal - EDP experience and future perspectives. *20th International Conference on Electricity Distribution*, (0569), 1 – 4. doi:10.1049/cp.2009.0849
- [15] SlideShare, "Projecto InovGrid" [Online] Disponível:
<http://www.slideshare.net/mbenquerenca/desenvolvimento-da-smartgrid-da-edp-projecto-inovgrid> , [Acedido: 1 Setembro 2015]
- [16] Lúcio, P., Paulo, P., & Craveiro, H. (2011). Inovcity - Building Smart Grids in Portugal, (0455), 6–9.
- [17] Millar, R. J., Fotuhi-firuzabad, M., & Lehtonen, M. (2013). 22 nd International Conference on Electricity Distribution APPLICATION OF PULSE CLOSING TECHNOLOGY FOR 22 nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm , 10-13 June 2013 Paper 0197, (0536), 10–13.
- [18] R.C.Ducan, M.F.McGranaghan, S.Santoso e H.W.Beaty *Electrical Power Systems Quality*, 2a ed., Nova York, McGraw-Hill, 2003
- [19] Math H.J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems*, IEEE press series, wiley-interscience
- [20] J.L. Afonso, GEPE, Apontamentos QEE, não publicado
- [21] Burgos, R. P., & Wiechmann, E. P. (2005). Extended voltage swell ride-through capability for PWM voltage-source rectifiers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(4), 1086–1098. doi:10.1109/TIE.2005.851643
- [22] E. F.Fuchs, M. A.S. Masoum, *Power Quality in Power Systems and electrical Machines*, Academic press Elsevier 2008
- [23] J. Arrillaga, B C Smith N R Watson, A R Wood, *Power system Harmonic analysis*, University of Canterbury, New Zealand,, Wiley
- [24] OnlineBook, "Power system harmonics" [Online] Disponível:
https://books.google.pt/books?id=mDGfHsEoiN8C&pg=PA9&lpg=PA9&dq=IEC+61000-2-2&source=bl&ots=b2GGrXxQw1&sig=fPr_rxCcNOrCyZCQdZw65qAzrWY&hl=pt-

PT&sa=X&ved=0CEkQ6AEwBWoVChMIqrrehuTuxwIVQW8UCh2WnQog#v=onepage&q=IEC%2061000-2-2&f=false, [Acedido: 11-09-2015]

[25] Phenomena, L. F. (2001). 77a/324/Cdv, 1–29.

[26] A.Mazer, LElectric Power Planning for Regulated and Deregulated Markets, IEEE press, Wiley-Interscience, 2007

[27] Prentice Hall, Electrical Power, Distribution and Transmission, Luce M.Faulkenberry & Wallter Coffe

[28] J. Martins. "Apontamentos de electrónica de potência", não publicado, 2011

[29] V. C. Meireles, "Corrente Alternada" em Circuitos Elétricos, 4a ed, Lisboa, Lidel, 2007

[30] G.M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, Wiley-Interscience, 2004

[31] H.Akagi, E.H. Watanabe, M.Aredes, "Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning", IEEE, Wiley-Interscience, 2007

[32] J. Driesen, T. V. Craenenbroeck e V. Dommelen, "The Registration of Harmonic Power by Analog and Digital Meters", IEEE Trans. Instr. and Measur., vol.47, no.1, pp.195-198, Fev. 1998.

[33] Alexander Eigeles Emanuel, "On the Assessment of Harmonic Pollution", IEEE Trans. on P.Deli., Vol. 10, No. 3, pp.1693-1698, Jul. 1995.

[34] E.C.Ifeachor, B.W.Jervis, "Digital Signal Processing", A Pratical Approach, 2ºed., Prentice Hall, 2002

[35] A.V.Oppenheim, A. S. Willsky, with S.H.Nawab, "Signals and Systems", 2ºed, prentice Hall, 1998

[36] Fairchild, "Regulador Tensão LM79xx", [Online] Disponível: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/LM/LM7915.pdf> [Acedido: 5 Abril 2015]

[37] Regulators, V., Information, O., & Diagram, B. (1999). Lm78Xx (Ka78Xx , Mc78Xx) Fixed Voltage Regulator (Positive) Lm78Xx (Ka78Xx , Mc78Xx) Fixed Voltage Regulator (Positive). Changes.

[38] Technologies GmbH & Co. KG , "CYHV025A" [Online] Disponível: <http://www.hallsensors.de/CYHVS025A.pdf> [Acedido 5 Abril 2015]

[39] LEM, "LA 55-P", [Online] Disponível: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/115010/LEM/LA55-P.html> [Acedido: 5 Abril 2015]

[40] Kit, E. (2012). Experimenter Kit User ' s Guide, (January).

[41] FLUKE, "FLUKE 345 PQ Clamp Meter", [Online] Disponível:
<http://en-us.fluke.com/products/power-quality-analyzers/fluke-345-clamp-meter.html>,
[Acedido: 25 Setembro 2015]

[42] Raspberry pi, "Tutorial Noobs" [Online] Disponível:
<https://www.raspberrypi.org/help/noobs-setup/> , [Acedido: 1 Outubro 2015]

ANEXO I

Anexo 1 - Principais fenômenos que causam perturbações eletromagnéticas classificados pelo IEC [19]

TABLE 2.1 Principal Phenomena Causing Electromagnetic Disturbances as Classified by the IEC

Conducted low-frequency phenomena
Harmonics, interharmonics
Signal systems (power line carrier)
Voltage fluctuations (flicker)
Voltage dips and interruptions
Voltage imbalance (unbalance)
Power frequency variations
Induced low-frequency voltages
DC in ac networks
Radiated low-frequency phenomena
Magnetic fields
Electric fields
Conducted high-frequency phenomena
Induced continuous-wave (CW) voltages or currents
Unidirectional transients
Oscillatory transients
Radiated high-frequency phenomena
Magnetic fields
Electric fields
Electromagnetic fields
Continuous waves
Transients
Electrostatic discharge phenomena (ESD)
Nuclear electromagnetic pulse (NEMP)

ANEXO II

Anexo 2 - Características dos fenômenos eletromagnéticos nos sistemas de potência [19]

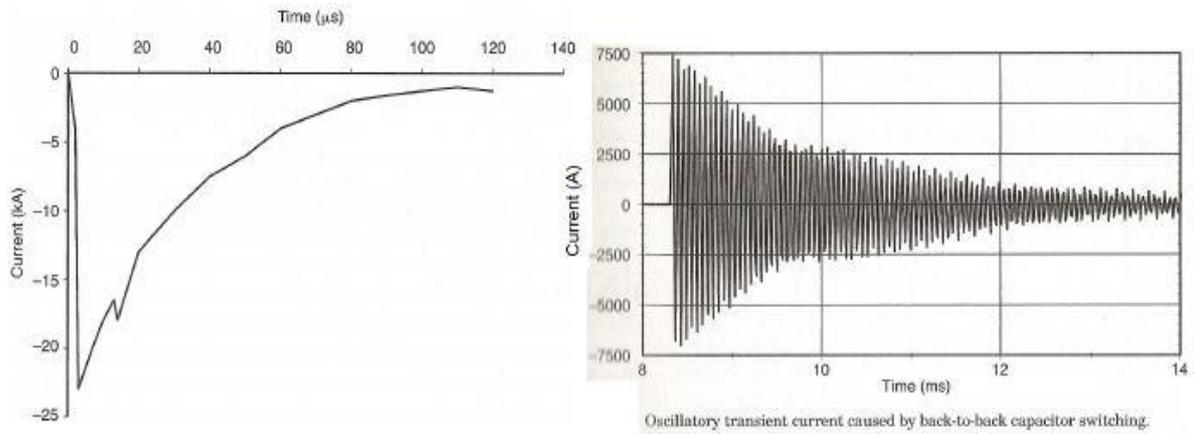
TABLE 2.2 Categories and Characteristics of Power System Electromagnetic Phenomena

Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1.0 Transients			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5-ns rise	<50 ns	
1.1.2 Microsecond	1- μ s rise	50 ns-1 ms	
1.1.3 Millisecond	0.1-ms rise	>1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low frequency	<5 kHz	0.3-50 ms	0-4 pu
1.2.2 Medium frequency	5-500 kHz	20 μ s	0-8 pu
1.2.3 High frequency	0.5-5 MHz	5 μ s	0-4 pu
2.0 Short-duration variations			
2.1 Instantaneous			
2.1.1 Interruption		0.5-30 cycles	<0.1 pu
2.1.2 Sag (dip)		0.5-30 cycles	0.1-0.9 pu
2.1.3 Swell		0.5-30 cycles	1.1-1.8 pu
2.2 Momentary			
2.2.1 Interruption		30 cycles-3 s	<0.1 pu
2.2.2 Sag (dip)		30 cycles-3 s	0.1-0.9 pu
2.2.3 Swell		30 cycles-3 s	1.1-1.4 pu
2.3 Temporary			
2.3.1 Interruption		3 s-1 min	<0.1 pu
2.3.2 Sag (dip)		3 s-1 min	0.1-0.9 pu
2.3.3 Swell		3 s-1 min	1.1-1.2 pu
3.0 Long-duration variations			
3.1 Interruption, sustained		>1 min	0.0 pu
3.2 Undervoltages		>1 min	0.8-0.9 pu
3.3 Overvoltages		>1 min	1.1-1.2 pu
4.0 Voltage unbalance		Steady state	0.5-2%
5.0 Waveform distortion			
5.1 DC offset		Steady state	0-0.1%
5.2 Harmonics	0-100th harmonic	Steady state	0-20%
5.3 Interharmonics	0-6 kHz	Steady state	0-2%
5.4 Notching		Steady state	0-1%
5.5 Noise	Broadband	Steady state	0.1-7%
6.0 Voltage fluctuations	<25 Hz	Intermittent	0.2-2 Pst
7.0 Power frequency variations		<10 s	

NOTE: s = second, ns = nanosecond, μ s = microsecond, ms = millisecond, kHz = kilohertz, MHz = megahertz, min = minute, pu = per unit.

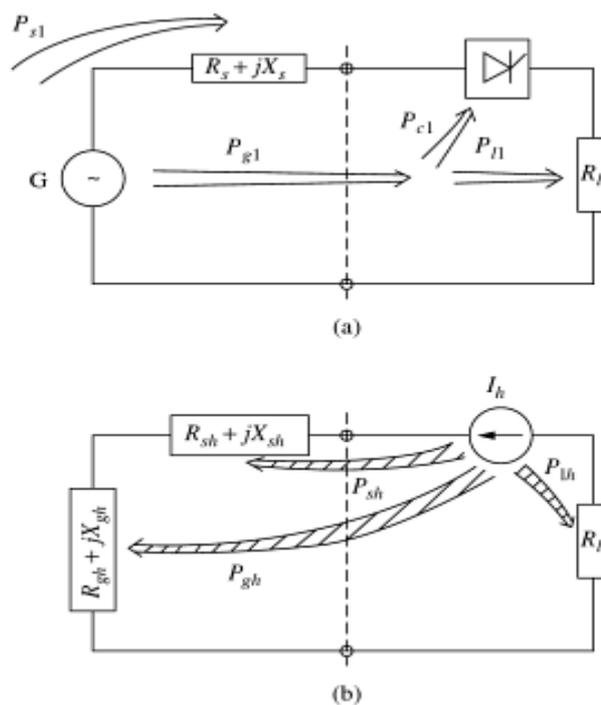
ANEXO III

Anexo 3 - Exemplo de transitório impulsivo (esquerda) e de um transitório oscilatório (direita) [18]



ANEXO IV

Anexo 4 - (a) fluxo da potência na frequência fundamental; (b) fluxo dos harmônicos de potência [24]



ANEXO V

Anexo 5 - Guias, recomendações e padrões na qualidade elétrica [22]

TABLE 1.5 Some Guides, Recommendations, and Standards on Electric Power Quality

Source	Coverage
	IEEE and ANSI Documents
IEEE 4: 1995	Standard techniques for high-voltage testing.
IEEE 100: 1992	Standard dictionary of electrical and electronic terms.
IEEE 120: 1989	Master test guide for electrical measurements in power circuits.
IEEE 141: 1993	Recommended practice for electric power distribution for industrial plants. Effect of voltage disturbances on equipment within an industrial area.
IEEE 142: 1993 (The Green Book)	Recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems.
IEEE 213: 1993	Standard procedure for measuring conducted emissions in the range of 300 kHz to 25 MHz from television and FM broadcast receivers to power lines.
IEEE 241: 1990 (The Gray Book)	Recommended practice for electric power systems in commercial buildings.
IEEE 281: 1994	Standard service conditions for power system communication equipment.
IEEE 299: 1991	Standard methods of measuring the effectiveness of electromagnetic shielding enclosures.
IEEE 367: 1996	Recommended practice for determining the electric power station ground potential rise and induced voltage from a power fault.
IEEE 376: 1993	Standard for the measurement of impulse strength and impulse bandwidth.
IEEE 430: 1991	Standard procedures for the measurement of radio noise from overhead power lines and substations.
IEEE 446: 1987 (The Orange Book)	Recommended practice for emergency and standby systems for industrial and commercial applications (e.g., power acceptability curve [5, Fig. 2-26], CBEMA curve).
IEEE 449: 1990	Standard for ferroresonance voltage regulators.
IEEE 465	Test specifications for surge protective devices.
IEEE 472	Event recorders.
IEEE 473: 1991	Recommended practice for an electromagnetic site survey (10 kHz to 10 GHz).
IEEE 493: 1997 (The Gold Book)	Recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems.
IEEE 519: 1993	Recommended practice for harmonic control and reactive compensation of static power converters.
IEEE 539: 1990	Standard definitions of terms relating to corona and field effects of overhead power lines.
IEEE 859: 1987	Standard terms for reporting and analyzing outage occurrences and outage states of electrical transmission facilities.
IEEE 944: 1986	Application and testing of uninterruptible power supplies for power generating stations.
IEEE 998: 1996	Guides for direct lightning strike shielding of substations.
IEEE 1048: 1990	Guides for protective grounding of power lines.
IEEE 1057: 1994	Standards for digitizing waveform recorders.
IEEE P1100: 1992 (The Emerald Book)	Recommended practice for powering and grounding sensitive electronic equipment in commercial and industrial power systems.
IEEE 1159: 1995	Recommended practice on monitoring electric power quality. Categories of power system electromagnetic phenomena.
IEEE 1250: 1995	Guides for service to equipment sensitive to momentary voltage disturbances.
IEEE 1346: 1998	Recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronics process equipment.
IEEE P-1453	Flicker.
IEEE/ANSI 18: 1980	Standards for shunt power capacitors.
IEEE/ANSI C37	Guides for surge withstand capability (SWC) tests.
IEEE/ANSI C50: 1982	Harmonics and noise from synchronous machines.
IEEE/ANSI C57.110: 1986	Recommended practice for establishing transformer capability when supplying nonsinusoidal load currents.
IEEE/ANSI C57.117: 1986	Guides for reporting failure data for power transformers and shunt reactors on electric utility power systems.
IEEE/ANSI C62.45: 1992 (IEEE 587)	Recommended practice on surge voltage in low-voltage AC power circuits, including guides for lightning arresters applications.
IEEE/ANSI C62.48: 1995	Guides on interactions between power system disturbances and surge protective devices.
ANSI C84.1: 1982	American national standard for electric power systems and equipment voltage ratings (60 Hz).

Anexo 6 - Guias, recomendações e padrões na qualidade elétrica [22] (continuação)

TABLE 1.5 Some Guides, Recommendations, and Standards on Electric Power Quality (continued)

Source	Coverage
ANSI 70	National electric code.
ANSI 368	Telephone influence factor.
ANSI 377	Spurious radio frequency emission from mobile communication equipment.
International Electrotechnical Commission (IEC) Documents	
IEC 38: 1983	Standard voltages.
IEC 816: 1984	Guides on methods of measurement of short-duration transients on low-voltage power and signal lines. Equipment susceptible to transients.
IEC 868: 1986	Flicker meter. Functional and design specifications.
IEC 868-0: 1991	Flicker meter. Evaluation of flicker severity. Evaluates the severity of voltage fluctuation on the light flicker.
IEC 1000-3-2:1994	Electromagnetic compatibility Part 3: Limits Section 2: Limits for harmonic current emissions (equipment absorbed current ≤ 16 A per phase).
IEC 1000-3-6: 1996	Electromagnetic compatibility Part 3: Limits Section 6: Emission limits evaluation for perturbing loads connected to MV and HV networks.
IEC 1000-4: 1991	Electromagnetic compatibility Part 4: Sampling and metering techniques.
EN 50160: 1994	Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems.
IEC/EN 60868-0	Flicker meter implementation.
IEC 61000 standards on EMC	Electromagnetic compatibility (EMC).
British Standards (BS) and European Norm Documents	
BSS406 (based on IEC 555 part 2)	Control harmonic emissions from small domestic equipment.
Other Documents	
ER G5/3	Basis of standards in some other (mostly commonwealth) countries, but it does not include notching and burst harmonics.
G5/4: 2001	Limiting harmonic voltage distortion levels on public networks at the time of connection of new nonlinear loads to ensure compatibility of all connected equipment.
UIE-DWG-2-92-D	Produced by the Distribution Working Group (DWG) of Union Internationale Electrotechnique (UIE). Includes guides for measurements of voltage dips and short-circuit interruptions occurring in industrial installations.
UIE-DWG-3-92-G	UIE guides for quality of electrical supply for industrial installations, including types of disturbances and relevant standards.
CBEMA Curves: 1983	Produced by the Computer Business Equipment Manufacturers Association for the design of the power supply for computers and electronic equipment.
ITI Curves (new CBEMA curves)	Information Technology Industry Council (the new name for CBEMA) application.

ANEXO VI

Anexo 7 - Características LM7915 [36]

Electrical Characteristics (LM7915) (Continued)

($V_I = -23V$, $I_O = 500mA$, $0^\circ C \leq T_J \leq +125^\circ C$, $C_I = 2.2\mu F$, $C_O = 1\mu F$, unless otherwise specified.)

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^\circ C$	-14.4	-15	-15.6	V	
		$I_O = 5mA$ to $1A$, $P_O \leq 15W$ $V_I = -18V$ to $-30V$	-14.25	-15	-15.75		
Line Regulation (Note1)	ΔV_O	$T_J = +25^\circ C$	$V_I = -17.5V$ to $-30V$	-	12	300	mV
			$V_I = -20V$ to $-26V$	-	6	150	
Load Regulation (Note1)	ΔV_O	$T_J = +25^\circ C$ $I_O = 5mA$ to $1.5A$	-	12	300	mV	
			$T_J = +25^\circ C$ $I_O = 250mA$ to $750mA$	-	4		150
Quiescent Current	I_Q	$T_J = +25^\circ C$	-	3	6	mA	
Quiescent Current Change	ΔI_Q	$I_O = 5mA$ to $1A$	-	0.05	0.5	mA	
		$V_I = -17.5V$ to $-30V$	-	0.1	1		
Temperature Coefficient of V_D	$\Delta V_O/\Delta T$	$I_O = 5mA$	-	-0.9	-	mV/ $^\circ C$	
Output Noise Voltage	V_N	$f = 10Hz$ to $100kHz$ $T_A = +25^\circ C$	-	250	-	μV	
Ripple Rejection	RR	$f = 120Hz$ $\Delta V_I = 10V$	54	60	-	dB	
Dropout Voltage	V_D	$T_J = +25^\circ C$ $I_O = 1A$	-	2	-	V	
Short Circuit Current	I_{SC}	$T_J = +25^\circ C$, $V_I = -35V$	-	300	-	mA	
Peak Current	I_{PK}	$T_J = +25^\circ C$	-	2.2	-	A	

Note:

1. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty is used.

Anexo 8 - Características LM7815 [37]

LM7815//R//RI ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(Refer to test circuit, $T_{MIN} < T_J < T_{MAX}$, $I_O = 500mA$, $V_I = 23V$, $C_I = 0.33\mu F$, $C_O = 0.1\mu F$, unless otherwise specified)

Characteristic	Symbol	Test Conditions	LM7815I			LM7815			Unit
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^\circ C$	14.4	15	15.6	14.4	15	15.6	V
		$5.0mA \leq I_O \leq 1.0A$, $P_D \leq 15W$ $V_I = 17.5V$ to $30V$ $V_I = 18.5V$ to $30V$	14.25	15	15.75	14.25	15	15.75	
Line Regulation	ΔV_O	$T_J = +25^\circ C$	$V_I = 17.5V$ to $30V$	11	300	11	300	mV	
			$V_I = 20V$ to $26V$	3	150	3	150		
Load Regulation	ΔV_O	$T_J = +25^\circ C$	$I_O = 5mA$ to $1.5A$	12	300	12	300	mV	
			$I_O = 250mA$ to $750mA$	4	150	4	150		
Quiescent Current	I_Q	$T_J = +25^\circ C$	5.2	8	5.2	8	mA		
Quiescent Current Change	ΔI_Q	$I_O = 5mA$ to $1.0A$ $V_I = 17.5V$ to $30V$ $V_I = 18.5V$ to $30V$		0.5		0.5	mA		
					1.0				
Output Voltage Drift	$\Delta V_O/\Delta T$	$I_O = 5mA$	-1		-1		mV/ $^\circ C$		
Output Noise Voltage	V_N	$f = 10Hz$ to $100kHz$, $T_A = +25^\circ C$	90		90		$\mu V/V_O$		
Ripple Rejection	RR	$f = 120Hz$ $V_I = 18.5V$ to $28.5V$	54	70	54	70	dB		
Dropout Voltage	V_D	$I_O = 1A$, $T_J = +25^\circ C$	2		2		V		
Output Resistance	R_O	$f = 1KHz$	19		19		m Ω		
Short Circuit Current	I_{SC}	$V_I = 35V$, $T_A = +25^\circ C$	250		250		mA		
Peak Current	I_{PK}	$T_J = +25^\circ C$	2.2		2.2		A		

* $T_{MIN} < T_J < T_{MAX}$

LM78XXI/RI: $T_{MIN} = -40^\circ C$, $T_{MAX} = +125^\circ C$

LM78XX/R: $T_{MIN} = 0^\circ C$, $T_{MAX} = +125^\circ C$

* Load and line regulation are specified at constant, junction temperature. Change in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty is used.

Anexo 9 - Características LM7805 [37]

LM7805/I/R/RI ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(Refer to test circuit, $T_{MIN} < T_J < T_{MAX}$, $I_O = 500mA$, $V_I = 10V$, $C_I = 0.33\mu F$, $C_O = 0.1\mu F$, unless otherwise specified)

Characteristic	Symbol	Test Conditions	LM7805I			LM7805			Unit
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^\circ C$	4.8	5.0	5.2	4.8	5.0	5.2	V
		$5.0mA \leq I_O \leq 1.0A$, $P_O \leq 15W$ $V_I = 7V$ to $20V$ $V_I = 8V$ to $20V$	4.75	5.0	5.25	4.75	5.0	5.25	
Line Regulation	ΔV_O	$T_J = +25^\circ C$	$V_O = 7V$ to $25V$	4.0	100		4.0	100	mV
			$V_I = 8V$ to $12V$	1.6	50		1.6	50	
Load Regulation	ΔV_O	$T_J = +25^\circ C$	$I_O = 5.0mA$ to $1.5A$	9	100		9	100	mV
			$I_O = 250mA$ to $750mA$	4	50		4	50	
Quiescent Current	I_Q	$T_J = +25^\circ C$		5.0	8		5.0	8	mA
Quiescent Current Change	ΔI_Q	$T_J = +25^\circ C$	$I_O = 5mA$ to $1.0A$	0.03	0.5		0.03	0.5	mA
			$V_I = 7V$ to $25V$				0.3	1.3	
			$V_I = 8V$ to $25V$		0.3	1.3			
Output Voltage Drift	$\Delta V_O / \Delta T$	$I_O = 5mA$		-0.8			-0.8		mV/ $^\circ C$
Output Noise Voltage	V_N	$f = 10Hz$ to $100KHz$, $T_A = +25^\circ C$		42			42		$\mu V/V_O$
Ripple Rejection	RR	$f = 120Hz$ $V_O = 8$ to $18V$	62	73		62	73		dB
Dropout Voltage	V_O	$I_O = 1A$, $T_J = +25^\circ C$		2			2		V
Output Resistance	R_O	$f = 1KHz$		15			15		m Ω
Short Circuit Current	I_{SC}	$V_I = 35V$, $T_A = +25^\circ C$		230			230		mA
Peak Current	I_{PK}	$T_J = +25^\circ C$		2.2			2.2		A

* $T_{MIN} < T_J < T_{MAX}$

LM78XXI/RI: $T_{MIN} = -40^\circ C$, $T_{MAX} = +125^\circ C$

LM78XX/R: $T_{MIN} = 0^\circ C$, $T_{MAX} = +125^\circ C$

* Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty is used.

ANEXO VII

Anexo 10 - Características CYHS025A

Electrical Parameters

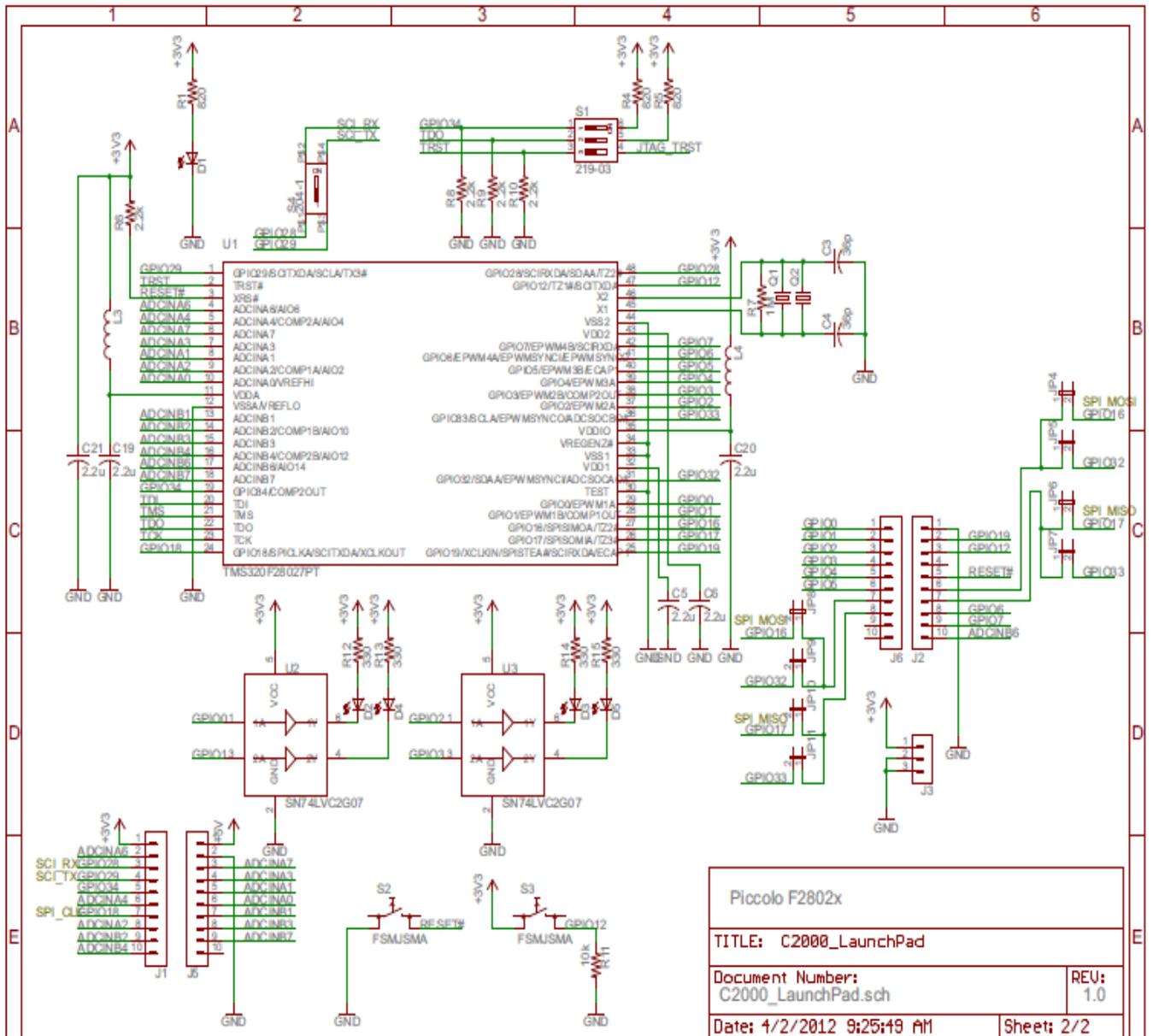
Parameters	Values			Unit
Rated input current (I_N)	±10			mA
Measuring range (I_P)	0~ ±14			mA
Rated measuring voltage	500			V
Max. measuring voltage	1000			V
Measuring resistance (R_M)		R_{Mmin}	R_{Mmax}	
	@±10mA	100	350	Ω
	@±14mA	100	190	Ω
Rated secondary current (I_S)	±25±0.5%			mA
Power supply (V_c)	±15 (±5%)			V
Turns ratio (N)	2500 : 1000			
Current consumption (I_c)	15+ I_S			mA
Isolation voltage (V_d)	2.5kV/50Hz/1min			
Measuring accuracy (X_G)	±0.8% FS, see application note			
Linearity (ϵ_L)	<0.2% FS			
Offset current (I_o)	±0.1			mA
Thermal drift of offset current I_o (-40°C~+85°C)	±0.5			mA
Response time (t_r)	<40			μs
Ambient operating temperature (T_A)	- 40°C ~ +85°C			
Ambient storage temperature (T_S)	-40°C ~ +125°C			
Primary coil resistance (R_p)	@ $T_a=25^\circ\text{C}$, 200			Ω
Secondary coil resistance (R_s)	@ $T_a=25^\circ\text{C}$, 110			Ω

Anexo 11 - Características LA 55-p [39]

Electrical data							
I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current		50		A		
I_p	Primary current, measuring range		0 .. ± 70		A		
R_M	Measuring resistance @		$T_A = 70^\circ\text{C}$	$T_A = 85^\circ\text{C}$			
			R_{Mmin}	R_{Mmax}	R_{Mmin}	R_{Mmax}	
		with ± 12 V	@ ± 50 A _{max}	10	100	60	95 Ω
			@ ± 70 A _{max}	10	50	60 ⁽¹⁾	60 ⁽¹⁾ Ω
		with ± 15 V	@ ± 50 A _{max}	50	160	135	155 Ω
			@ ± 70 A _{max}	50	90	135 ⁽²⁾	135 ⁽²⁾ Ω
I_{SN}	Secondary nominal r.m.s. current		50		mA		
K_N	Conversion ratio		1 : 1000				
V_C	Supply voltage (± 5 %)		± 12 .. 15		V		
I_C	Current consumption		10 (@ ± 15 V) + I_S		mA		
V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 mn		2.5		kV		
Accuracy - Dynamic performance data							
X	Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ ± 15 V (± 5 %)	± 0.65		%		
		@ ± 12 .. 15 V (± 5 %)	± 0.90		%		
E_L	Linearity		< 0.15		%		
I_O	Offset current @ $I_p = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$			Typ	Max		
I_{OM}	Residual current ⁽³⁾ @ $I_p = 0$, after an overload of $3 \times I_{PN}$				± 0.2 mA		
I_{OT}	Thermal drift of I_O	0 $^\circ\text{C}$.. + 70 $^\circ\text{C}$	± 0.1		± 0.5 mA		
		- 25 $^\circ\text{C}$.. + 85 $^\circ\text{C}$	± 0.1		± 0.6 mA		
t_{ra}	Reaction time @ 10 % of $I_{p,max}$		< 500		ns		
t_r	Response time @ 90 % of $I_{p,max}$		< 1		μs		
di/dt	di/dt accurately followed		> 200		A/ μs		
f	Frequency bandwidth (- 1 dB)		DC .. 200		kHz		
General data							
T_A	Ambient operating temperature		- 25 .. + 85		$^\circ\text{C}$		
T_S	Ambient storage temperature		- 40 .. + 90		$^\circ\text{C}$		
R_S	Secondary coil resistance @	$T_A = 70^\circ\text{C}$	80		Ω		
		$T_A = 85^\circ\text{C}$	85		Ω		
m	Mass		18		g		
		Standards ⁽⁴⁾		EN 50178			

ANEXO VIII

Anexo 12 - Esquemático da placa TMS320F28027 [40]



ANEXO IX

Anexo 13 - Especificações FLUKE 345 PQ *Clamp Meter*

Specifications		
Display	Color transmissive LCD 320 x 240 pixels (70 mm diagonal) with 2 level backlight	
Power supply	Battery type 1.5 V Alkaline AA MN 1500 or IEC LR6 x 6	
Battery life typically	> 10 hours (backlight on full) > 12 hours (backlight reduced)	
Battery eliminator	Input	110/230 V 50/60 Hz
	Output	15 VDC, 300 mA
Ambient conditions (for indoor use only)		
Reference conditions	All accuracies stated at 23°C ± 1°C (73.4°F ± 1.8°F)	
Operating temperature	0°C to 50°C (32°F to 122°F)	
Temperature coefficient of current	≤ ± 0.15% of rdg per °C	
Temperature coefficient of voltage	≤ ± 0.15% of rdg per °C	
Maximum relative humidity	80% for temperatures up to 31°C (87°F) decreasing linearly to 50% relative humidity at 40°C (104°F)	
Maximum operating altitude	2000 m	
Electrical safety		
Maximum safe working voltages	Safety IEC 61010-1 600 V CAT IV double or reinforced insulation, pollution degree 2 Protection IP40; EN60529	
Current measurement	600 VAC rms or DC between uninsulated conductor and ground	
Voltage measurement	600 VAC rms or DC between either input terminal and ground, or 825 V between energized phase voltages (delta power config.)	
EMC		
Emission	IEC/EN 61326-1:1997 A	
Immunity	IEC/EN 61326-1:1997 Annex C Performance Criterion B	
Mechanical		
Dimensions (L x W x D)	300 x 98 x 52 mm (12 x 3.75 x 2 in)	
Weight including batteries	820 g (1.8 lb)	
Jaw opening	60 mm	
Current measurement (DC, DC rms, AC rms)		
Measuring range	0 to 2000 A DC or 1400 AC rms	
Autorange facility	40 A / 400 A / 2000 A	
Resolution	10 mA in 40 A range 100 mA in 400 A range A in 2000 A range	
Accuracy: DC and DC rms	I > 10 A ± 1.5% rdg ± 5 digits I < 10 A ± 0.2 A	
Accuracy: AVG	I > 10 A ± 3% rdg ± 5 digits I < 10 A ± 0.5 A	
Accuracy: Pk	I > 10 A ± 5% rdg ± 5 digits I < 10 A ± 0.5 A	
Accuracy: Ahr	I > 10 A ± 2% rdg ± 5 digits I < 10 A ± 0.5 Ahr	
Accuracy: CF (Crest Factor)	1.1 ≤ CF < 3 ± 3% rdg ± 5 digits 3 ≤ CF < 5 ± 5% rdg ± 5 digits Resolution 0.01	
Accuracy: RPL (Ripple)	2% ≤ RPL < 100% ± 3% rdg ± 5 digits 100% ≤ RPL < 600% ± 5% rdg ± 5 digits Resolution 0.1% IDC > 5 A, IAC > 2 A	
All measurements DC and 15 Hz to 1 kHz Maximum overload 10,000 A or rms x frequency < 400,000 Amps rms is a true-rms measurement (AC + DC)		
Voltage measurement (DC, DC rms, AC rms)		
Measuring range	0 to 825 VDC or AC rms	
Autorange facility	4 V / 40 V / 400 V / 750 V	
Resolution	1 mV in 4 V range 10 mV in 40 V range 100 mV in 400 V range 1 V in 750 V range	
Accuracy: DC and DC rms	V > 1 V ± 1% rdg ± 5 digits V < 1 V ± 0.02 V	
Accuracy: AVG	V > 1 V ± 3% rdg ± 5 digits V < 1 V ± 0.03 V	
Accuracy: Pk	V > 1 V ± 5% rdg ± 5 digits V < 1 V ± 0.03 V	
Accuracy: CF (Crest Factor)	1.1 ≤ CF < 3 ± 3% rdg ± 5 digits 3 ≤ CF < 5 ± 5% rdg ± 5 digits Resolution 0.01	
Accuracy: RPL (Ripple)	2% ≤ RPL < 100% ± 3% rdg ± 5 digits 100% ≤ RPL < 600% ± 5% rdg ± 5 digits Resolution 0.1% VDC > 0.5 V, VAC > 0.2 V	
All measurements DC and 15 Hz to 1 kHz Maximum overload 1,000 V rms Volts rms is a true-rms measurement (AC + DC)		

Anexo 14 - Especificações FLUKE 345 PQ *Clamp Meter*(continuação)

Harmonics		
THD (Total Harmonic Distortion)	1% ≤ THD < 100%	±3% rdg ±5 digits
	100% ≤ THD < 600%	±5% rdg ±5 digits
	Resolution	0.1%
DF (Distortion Factor)	1% ≤ DF < 100%	±3% rdg ±5 digits
	Resolution	0.1%
	H02 ≤ V _{harm} < H13	±5% ±2 digits
	H13 ≤ V _{harm} ≤ H30	±10% ±2 digits
All measurements up to 30th harmonic (40th harmonic for 15 Hz to 22 Hz) Frequency range of fundamental F ² 15 Hz to 22 Hz and 45 Hz to 65 Hz V _{acrms} > 1V		
Watts measurement (single and three-phase) (DC, DC rms, AC rms)		
Measuring range	0 to 1650 kW DC or 1200 kW AC	
Measuring range	4 kW, 40 kW, 400 kW, 1650 kW	
Resolution	1 W in 4 kW 10 W in 40 kW 100 W in 400 kW 1 kW in 1200 kW	
Accuracy	2.5% rdg ±5 digits W1∅ < 2 kW ±0.08 kW W3∅ < 4 kW ±0.25 kW	
VA measurement (single- and three-phase) (DC, DC rms, AC rms)		
Measuring range	0 to 1650 kVA DC or 1200 kVA AC	
Autorange facility	4 kVA, 40 kVA, 400 kVA, 1650 kVA	
Resolution	1 VA in 4 kVA 10 VA in 40 kVA 100 VA in 400 kVA 1 kVA in 1200 kVA	
Accuracy	VA > 2 kVA	2.5% rdg ±5 digits
	VA < 2 kVA	±0.08 kVA
VAR measurement (single- and three-phase)		
Measuring range	0 to 1250 kVAR	
Autorange facility	4 kVAR, 40 kVAR, 400 kVAR, 1200 kVAR	
Resolution	1 VAR in 4 kVAR 10 VAR in 40 kVAR 100 VAR in 400 kVAR 1 kVAR in 1200 kVAR	
Accuracy	VAR > 4 kVAR	±2.5% rdg ±5 digits
	VAR < 4 kVAR	±0.25 kVAR
Power factor range	0.3 < PF < 0.99	
Power factor (single- and three-phase)		
Measuring range	0.3 capacitive to 1.0 and 1.0 to 0.3 inductive (72.5° capacitive to 0° and 0° to 72.5° inductive)	
Resolution	0.001	
Accuracy	±3°	
Frequency range	15 Hz to 1 kHz	
Displacement power factor (single- and three-phase)		
Measuring range	0.3 capacitive to 1.0 and 1.0 to 0.3 inductive (72.5° capacitive to 0° and 0° to 72.5° inductive)	
Resolution	0.001	
Accuracy	±3°	
Frequency range	15 Hz to 22 Hz and 45 Hz to 65 Hz	
Kilowatt hour (kWhr)		
Measuring range	40,000 kWhr	
Autorange facility	4 kWhr, 40 kWhr, 400 kWhr, 4,000 kWhr, 40,000 kWhr	
Resolution	1 kWhr in 4 kWhr Range 10 kWhr in 40 kWhr Range 100 kWhr in 400 kWhr Range 1 kWhr in 4,000 kWhr Range 10 kWhr in 40,000 kWhr Range	
Accuracy	kWhr > 2 kWhr	±3% ±5 digits
	kWhr < 2 kWhr	±0.08 kWhr
All Watts /VA /VAR /PF measurements	Frequency range	DC and 15 Hz to 1 kHz
	Current range	10 A to 1400 A rms
	Voltage range	1 V to 825 V rms
	Maximum input	825 V rms / 1400 A rms
	Maximum overload	1000 V rms / 10,000 A All measurements DC and 15 Hz to 1 kHz. Maximum overload 10,000 A or rms x frequency < 400,000
Frequency measurement (from current or voltage sources)		
Measuring range	15 Hz to 1 kHz	
Resolution	0.1 Hz	
Accuracy	15 to 22 Hz ±0.5% rdg 40 Hz to 70 Hz ±0.5% rdg 15 Hz to 1000 Hz ±1% rdg	
Current range	10 A to 1400 A rms	
Voltage range	1 V to 825 V rms	
Scope function		
Current measurement	Range	10 A / 20 A / 40 A / 100 A / 200 A / 400 A / 1000 A / 2000 A
	Resolution	1 A in 40 A 10 A in 400 A 50 A in 2000 A
	Accuracy	±3% rdg ±1 pixel
	Maximum overload	10,000 A
Voltage measurement	Range	4 V / 10 V / 20 V / 40 V / 100 V / 200 V / 400 V / 1000 V
	Resolution	100 mV in 4 V 1 V in 40 V 10 V in 400 V 31.25 V in 1000 V
	Accuracy	±2% rdg ±1 pixel
	Maximum overload	1000 V rms
	Frequency range	DC and 15 Hz to 600 Hz
Time base	2.5 ms, 5 ms, 10 ms, 25 ms, 50 ms/div	
Refresh rate	0.5 seconds	
Maximum sampling rate	15.625 kHz	

