

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Efeitos da poluição harmónica em instalações industriais

Tiago Edgar Carvalho Rodrigues

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Dr. José Rui da Rocha Pinto Ferreira

Co-orientador: Eng. José Júlio Araújo Alves

08-10-2014

A Dissertação intitulada

“Efeitos da Poluição Harmónica em Instalações Industriais”

foi aprovada em provas realizadas em 08-10-2014

o júri



Presidente Professor Doutor Helder Filipe Duarte Leite
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



Professora Doutora Fernanda de Oliveira Resende
Professora Auxiliar da Universidade Lusófona



Professor Doutor José Rui da Rocha Pinto Ferreira
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

O autor declara que a presente dissertação (ou relatório de projeto) é da sua exclusiva autoria e foi escrita sem qualquer apoio externo não explicitamente autorizado. Os resultados, ideias, parágrafos, ou outros extratos tomados de ou inspirados em trabalhos de outros autores, e demais referências bibliográficas usadas, são corretamente citados.



Autor - Tiago Edgar Carvalho Rodrigues

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Resumo

Com o decorrer dos tempos temo-nos deparado com o crescente avanço tecnológico e aumento da utilização de equipamentos eletrónicos na indústria mundial. Apesar de elevarem a produtividade, comodidade dos processos de produção e promoverem a utilização de cargas eficientes, os diversos equipamentos podem dar origem a cargas não-lineares que são responsáveis pela existência de harmónicos. A Bosch Car Multimedia Portugal S.A é uma das empresas com maior influência social e económica do norte do país, que aposta na certificação com vista à diminuição do impacto ambiental e melhoria da eficiência dos processos. Assim, o presente trabalho focou-se na análise das distorções harmónicas presentes na instalação elétrica da empresa de forma a diminuir os custos energéticos, prolongar a vida útil e aumentar a eficiência dos equipamentos.

Para tal, de acordo com a norma do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) foi determinado o Ponto de Acoplamento Comum, localizado na saída do secundário do transformador. Uma vez que a subestação da empresa alimenta três postos de transformação (PT) e que estes se encontram interligados, com recurso a analisadores de rede mediram-se as correntes harmónicas do lado do secundário dos transformadores de cada um dos PTs. De forma a compreender o comportamento da instalação ao longo tempo, foi elaborado um histórico da taxa de distorção harmónica da corrente, o qual foi incluído na base de dados da empresa. Através das medições efetuadas e com recurso ao histórico deste ano verificou-se que a taxa de distorção harmónica é mais elevada no PT1.

Em paralelo, foram realizadas medições em pontos mais interiores da instalação elétrica, junto de quadros de distribuição, com vista a determinar, na área produtiva da empresa, a zona mais afetada pela distorção harmónica, tendo-se verificado que o quadro B é o mais afetado. Adicionalmente, observaram-se, no mesmo quadro, correntes elevadas no cabo de neutro, sendo que em alguns casos estas eram superiores à corrente que circulava numa das fases.

Este trabalho permitiu (i) determinar a zona da instalação mais afetada pela distorção harmónica (PT1), e; (ii) identificar problemas de distribuição de cargas pelas três fases nas zonas interiores da instalação (quadro B), os quais poderão, no futuro, ser alvo de ações de melhoria.

Abstract

A raised technological development as well as an enlarged usage of electronic equipment in the industry has been widely observed. Although electronic equipment allows an increase in productivity, simplification of production processes and promote the use of efficient loads, it may also originate non-linear loads that cause harmonic distortion. The Bosch Car Multimedia Portugal SA is one of the companies with a major social and economic impact in the north of the country, giving special attention to certification in order to reduce the environmental impact and improve the efficacy of the processes. Thus, in an attempt to reduce energy costs, extend the life and increase the efficiency of equipment, this work focused on the analysis of harmonic distortion in the company electrical installation.

For that, and according to the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), the point of common coupling was determined, which was located at the secondary output of the transformer. Since the company substation supply three transformer station (PT) and these are interconnected, the harmonic currents of the secondary side of each of the transformers were measured with the aid of network analyzers. In order to understand the behavior of the installation over time, a historical rate of harmonic current distortion was included in the database of the company. By analyzing the values obtained during the last year it was found that the rate of harmonic distortion was higher in the PT1.

In parallel, measurements were done in the innermost parts of the electrical installation, nearby the distribution boards, to determine which could be the area most affected by harmonic distortion in the production section, where the board B was demonstrated to be the most affected. Additionally, high neutral currents were detected in the same distribution board, with neutral currents being, in some cases, higher than the currents circulating in the phases.

This work allowed to: (i) determine the area most affected by harmonic distortion (PT1), and; (ii) identify problems of load distribution in the inner part of the electrical installation (board B), which may, in the future, be the target of corrective actions.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao Professor José Rui Ferreira por todo o apoio, pelas ideias e pela orientação durante a realização desta dissertação.

Gostaria de agradecer à Bosch pela oportunidade que me deu, em especial ao Eng. Pedro Pereira, ao Eng. João Oliveira e ao Eng. Júlio Alves. Gostaria de deixar ainda uma palavra de agradecimento ao Orlando Rego por todos os conselhos, ao Rogério Pires pela companhia e a todos os colegas com quem convivi neste período.

A realização desta dissertação não teria sido possível sem os meus colegas que me acompanharam durante o percurso académico, Sofia Vieira, Vitor Pinto, Marco Silva, Sara Costa, Nuno Novo, João Oliveira obrigado pelas directas e pelas noites académicas. Um agradecimento especial à Mariana Magalhães, pela paciência, pelos desabafos e pelo facto de me acompanhar desde as primeiras aulas de MaFiKi até ao último dia na faculdade, e sei que estará presente durante muito mais tempo. Quero agradecer ao Pedro Vasconcelos pelas noites de estudo no J, as conversas, e as aventuras que passámos, o teu apoio foi fundamental.

Aos meus pais e irmão por toda a compreensão e por todo o esforço que fizeram.

À família Amorim por todas as palavras de encorajamento e pela companhia ao longo destes anos.

Um agradecimento muito especial à Diana Amorim por toda a paciência, apoio, pressão, críticas e correções (em especial nesta parte final), que foram necessários para a realização desta importante etapa da minha vida.

Não poderia terminar sem agradecer ao meu colega de carteira do primeiro ano, se não fosse a dedicação dele não teria chegado até aqui. Obrigado avô Domingos. Um obrigado também ele especial à minha avó Olívia pela educação, e por me ter passado todos os valores que fazem de mim a pessoa que sou. Obrigado a toda a minha família pelo apoio incondicional.

"The most beautiful thing we can experience is the mysterious. It is the source of all true art and all science. He to whom this emotion is a stranger, who can no longer pause to wonder and stand rapt in awe, is as good as dead: his eyes are closed."

Albert Einstein

Índice

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
Índice	ix
Lista de figuras	xi
Lista de tabelas	xiii
Abreviaturas e Símbolos	xv
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento	2
1.2 - Apresentação da Bosch Car Multimedia Portugal S.A.....	6
1.2.1. Proposta de valor	7
1.3 - Objetivos	8
1.4 - Estrutura da dissertação.....	8
Capítulo 2	9
Influência das correntes harmónicas na qualidade da energia	9
2.1 Introdução.....	9
2.2 Qualidade da energia elétrica (QEE)	9
2.3 Harmónicas.....	11
2.4 Harmónicas num sistema trifásico	12
2.5 Indicadores de medição de correntes harmónicas	13
2.6 Causas das correntes harmónicas	14
2.7 Consequências das correntes harmónicas nos equipamentos de uma instalação elétrica industrial.....	17
2.7.1. Bateria de condensadores	18
2.7.2. Transformadores	18
2.7.3. Máquinas rotativas.....	20
2.7.4. Equipamentos de proteção.....	20
2.8 Sumário do capítulo 2.....	21
Capítulo 3	23
Monitorização.....	23

3.1	Introdução	23
3.2	Normas aplicáveis	24
3.2.1.	<i>IEEE Std. 519-1992</i>	24
3.2.2.	IEC 61000-2-2.....	24
3.2.3.	IEC 61000-3-4.....	25
3.2.4.	<i>EN 50160</i>	26
3.3	Instrumentos de medida utilizados.....	27
3.4	Sumário do capítulo 3	28
Capítulo 4	.....	29
Caso de estudo	.....	29
4.1	Caso de estudo 1 - Identificação dos níveis de correntes harmónicas na instalação elétrica.	29
4.2	Caso de estudo 2 - Identificação dos equipamentos que produzem níveis elevados de correntes harmónicas.	30
4.3	Caso de estudo 3 - Influência da bateria de condensadores na produção de correntes harmónicas.....	30
4.4	Caso de estudo 4 - Determinação dos níveis de distorção harmónica na área produtiva.....	31
4.5	Determinação dos níveis de distorção harmónica nas saídas do quadro que apresenta maiores distorções harmónicas.	32
4.6	Sumário do capítulo 4.	32
Capítulo 5	.....	33
Resultados	.....	33
Capítulo 6	.....	52
Discussão	.....	52
Capítulo 7	.....	59
Conclusão e perspetivas futuras	.....	59
Referências	.....	63

Lista de figuras

Figura 1-1- Consumo energético mundial no ano de 2000[3].	2
Figura1-2 - Consumo energético mundial no ano de 2012 [4]	2
Figura 1-3 - Crescimento entre 2011 e 2012 [5]	3
Figura 1-4 - Previsão do consumo energético mundial	3
Figura 1-5:Consumo energético anual[6]	4
Figura 1-6: Consumos energético nas diferentes áreas	4
Figura 1-7:Evolução das vendas dos maiores produtores de <i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i> [8]	7
Figura 2-1: Conjunto de sequência positiva	12
Figura 2-2: Conjunto de sequência negativa	12
Figura 2-3: Conjunto de sequência zero	13
Figura 2-4: Valores anuais das vendas de equipamentos de electrónicos [22]	15
Figura 2-5:Previsão de vendas para as diferentes potências [22]	15
Figura 2-6: Espectro harmónico de cargas não lineares	16
Figura 2-7: Distorção da corrente de magnetização em transformadores	19
Figura 4-1:Exemplo de identificação do PCC de uma instalação[31].	29
Figura 4-2:Controlador do fator de potência instalado na bateria de condensadores do PT1	31
Figura 5-1: Espectro harmónico da corrente do transformador do PT1	35
Figura 5-2:Espectro harmónico da corrente do transformador 1 do PT2	35
Figura 5-3:Espectro harmónico da corrente do transformador 2 do PT2	35
Figura 5-4:Espectro harmónico da corrente do transformador 3 do PT2	36
Figura 5-5:Espectro harmónico da corrente do transformador do PT3	36

Figura 5-6:Gráfico da variação do $\cos \phi$ no PT1 durante a manutenção	39
Figura 5-7: Gráfico da THD _i dos compressores.....	40
Figura 5-8: Gráfico da corrente dos compressores	40
Figura 5-9: : Gráfico da corrente dos <i>chillers</i>	41
Figura 5-10: Gráfico da THD _i dos <i>chillers</i>	41
Figura 6-1:Diagrama vetorial das correntes e das tensões nas fases de uma carga equilibrada ligada em estrela	57

Lista de tabelas

Tabela 1-1: Evolução do consumo anual[7]	5
Tabela 3-1: Dados recomendados em percentagem pela IEEE Std 519-1992 para a classe de tensão: $V_n \leq 69$ kV	24
Tabela 3-2: Níveis de distorção harmónica individual para sistemas eléctricos de baixa tensão conforme o IEC 61000-2-2.	25
Tabela 3-3: Valores recomendados pela IEC 61000-3-4 para as correntes harmónicas.....	25
Tabela 3-4: Valores recomendados pela EN 50160 para as harmónicas de tensão	26
Tabela 5-1: Valores médios em percentagem da THD_i durante o ano de 2014	33
Tabela 5-2: Valores médios em percentagem da THD_u durante o ano de 2014.....	34
Tabela 5-3: Valores referentes aos limites da instalação tendo em conta os limites impostos pela norma resultantes da razão entre I_{SC} e I_L	34
Tabela 5-4: Dados referentes ao cálculo do fator K e respetiva potência.....	37
Tabela 5-5: Valores obtidos para a THD durante a ação de manutenção.....	38
Tabela 5-6: Valores das diferentes taxas de distorções harmónicas (média de valores entre Fevereiro e Agosto de 2014)	43
Tabela 5-7: Dados da corrente das diferentes saídas do quadro B.....	44
Tabela 5-8: Dados da THD_i das diferentes saídas do quadro B	45
Tabela 5-9: Dados da TDD das diferentes saídas do quadro B	46
Tabela 5-10: Valores das componentes harmónicas da corrente para a fase 1	47
Tabela 5-11: Valores das componentes harmónicas da corrente para a fase 2	48
Tabela 5-12: Valores das componentes harmónicas da corrente para a fase 3	49
Tabela 5-13: Valores das componentes harmónicas da corrente para o condutor de neutro ..	50
Tabela 6-1: Tabela de seleção da bateria de compensação tendo em conta a THD_i	52
Tabela 6-2: de seleção da bateria de compensação tendo em conta a THD_u	52

Tabela 6-3:Valores percentuais do consumo de corrente das cargas associado ao PT1 56

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas (ordenadas por ordem alfabética)

CEI	Comissão Eletrotécnica Internacional
DEEC	Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
EMAS	Sistema de Eco-gestão e Auditoria da União Europeia
ESP	<i>Electronic Stability Program</i>
FC	Fator de Crista
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FP	Fator de Potência
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
OSHAS	<i>Occupational Health and Safety Assessment Services</i>
PCC	<i>Point of Common Coupling</i>
PT	Posto de Transformação
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
REA	Relatório do Estado do Ambiente
SI	Sistema Internacional
TDD	<i>Total Demand Distortion</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
VEV	Variador Eletrónico de Velocidade

Lista de símbolos

$x(t)$	Função periódica
a_0	Valor médio da função $x(t)$
a_n	coeficientes da série, os quais se estendem até à n -ésima ordem harmónica
b_n	coeficientes da série, os quais se estendem até à n -ésima ordem harmónica
ω	Frequência angular

T	Período da função
THD_u	Taxa de distorção harmónica da tensão
V_h	Valor em percentagem do harmónico de tensão h
V_1	Valor em percentagem do harmónico fundamental referente à corrente
THD_i	Taxa de distorção harmónica da corrente
I_h	Valor em percentagem do harmónico de corrente h
I_1	Valor em percentagem do harmónico fundamental referente à corrente
I_l	Valor médio em percentagem da corrente máxima registada durante um período de medições igual a 12 meses
X_C	Impedância do condensador
C	Capacidade do condensador
I_{sc}	Corrente de curto-circuito

Capítulo 1

Introdução

Desde os primeiros tempos que o Homem tem a capacidade de utilizar os recursos naturais como ferramentas que o auxiliam na resolução dos problemas diários. Se, inicialmente, existia um equilíbrio entre as necessidades do ser humano e a capacidade de renovação de recursos energéticos, atualmente, assistimos a uma total dependência energética, com consequentes danos ambientais irreversíveis. De facto, a dependência energética a nível mundial tem aumentado de forma a corresponder às necessidades domésticas e industriais, sendo a energia elétrica a forma mais versátil e conveniente de energia.

Apesar de, nas últimas décadas, termos presenciado a um aumento exponencial da indústria mundial que acarreta, necessariamente, um aumento do consumo dos recursos naturais para produção de energia elétrica, atualmente, tem-se verificado uma crescente consciencialização, por parte dos industriais, relativamente à necessidade de gestão energética através de um consumo eficiente. Assim, no panorama industrial, a procura do aumento dos benefícios económicos encontra-se, hoje em dia, muitas vezes associada à promoção de uma filosofia de gestão que encoraja a implementação de melhorias do ponto de vista ambiental. Um consumo eficiente da energia está agora associado a inovação o que, por conseguinte, resulta no crescimento e competitividade, associando também benefícios ao nível da certificação das empresas. Deste modo, torna-se indispensável compreender, não só a dinâmica de uso da energia elétrica, determinando onde, quando, quanto, como e porque se consome energia [1][2], mas também desenvolver estratégia que permitam reduzir o impacto ambiental e os custos associado ao seu uso.

Neste capítulo será, inicialmente, apresentada a importância da energia elétrica a nível mundial através dos seus níveis de consumo, bem como as previsões para os próximos anos. Posteriormente, numa aproximação à realidade nacional, mostrar-se-á o fator de impacto do setor industrial ao nível do consumo energético. Por fim, será feita a apresentação da empresa onde foi realizada esta dissertação assim como os objetivos definidos e a estrutura desta dissertação.

1.1 - Enquadramento

A dependência energética a nível mundial tem aumentado de forma a corresponder às necessidades domésticas e industriais. Com um mercado cada vez mais competitivo em todos os setores, é imperativo que haja investimento no desenvolvimento de novas tecnologias para melhoria do processo produtivo. A introdução de novos equipamentos no processo de produção permite um aumento da qualidade do produto final, diminuindo simultaneamente os custos produtivos.

Globalmente o consumo energético tem vindo a crescer ao longo dos anos, sendo possível constatar pelas figuras 1-1 e 1-2 que este tem progredido de forma exponencial nas grandes economias mundiais, ao passo que, em países como Portugal (figura 1-3), este crescimento não foi tão acentuado.

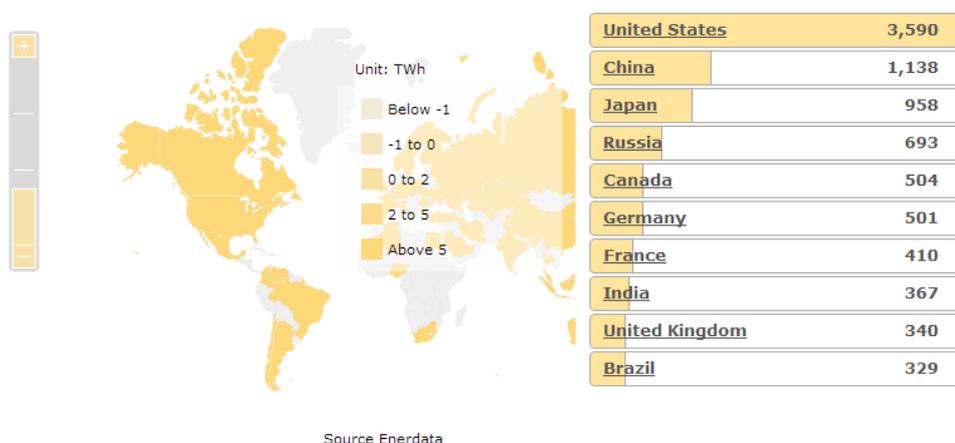


Figura 1-1- Consumo energético mundial no ano de 2000[3].



Figura1-2 - Consumo energético mundial no ano de 2012 [4]

Com as dificuldades que se têm verificado na economia mundial, os níveis de consumo de energia não aumentaram da forma que se previa em anos anteriores, existindo casos, tais como Portugal e Itália, por exemplo, que acabaram mesmo por reduzir os níveis do consumo energético.

Não se pode garantir que esta diminuição seja causada apenas por motivos político-económicos, a utilização e a evolução tecnológica ao nível da eletrónica de potência certamente terá a sua cota de participação desta diminuição. Também o aumento da eficiência dos equipamentos eletrónicos, e as várias ações de sensibilização ambiental terão o seu impacto nesta previsão estatística.



Figura 1-3 - Crescimento entre 2011 e 2012 [5]

É espectável que ocorra, nos próximos anos, uma recuperação do crescimento económico provocando um novo aumento global do consumo energético. Sendo que, para os países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) esse aumento não seja tão evidente, figura 1.4.

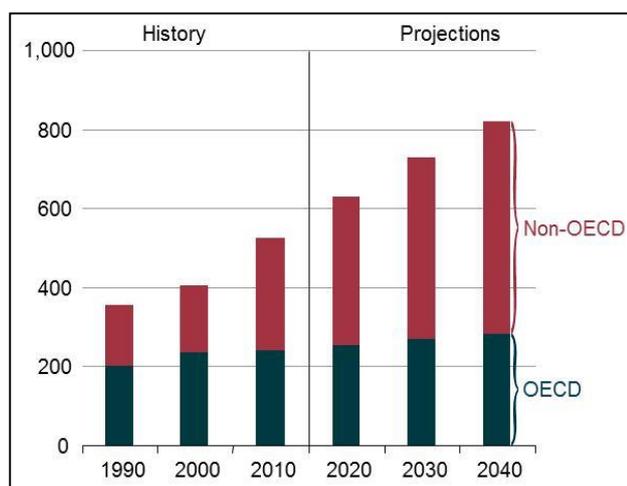


Figura 1-4 - Previsão do consumo energético mundial[6]

4 Introdução

A nível nacional é possível constatar, segundo o Relatório do Estado do Ambiente (REA) de 2013[6], que a utilização do petróleo apesar do seu decréscimo é a grande fonte de energia primária utilizada, tendo o seu consumo tem vindo desde 2005 a diminuir, figura 1.5. Tendo em conta esta diminuição juntamente com a diminuição do consumo energético o único aumento constante que se verifica é a utilização de energia elétrica.

Os transportes (35,8%) são a grande fonte de consumo seguido pela indústria (33,7%) e o consumidor doméstico (16,6%), figura 1-6.

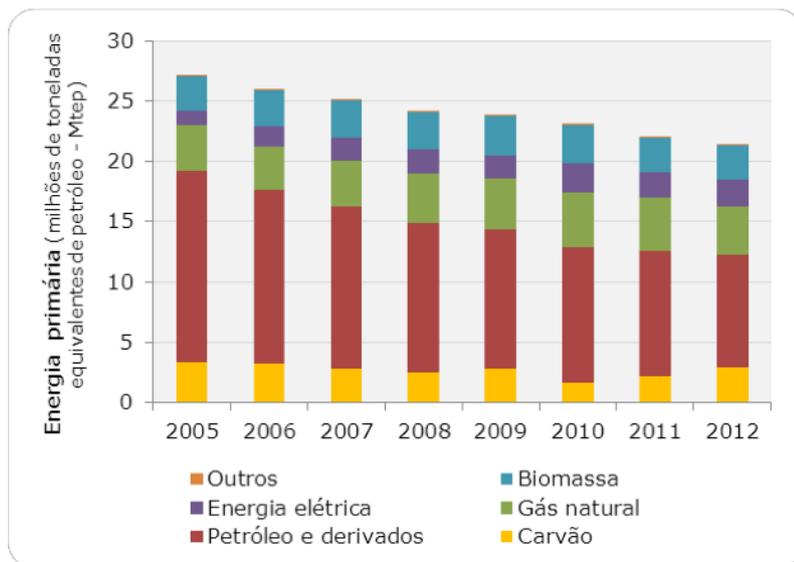


Figura 1-5: Consumo energético anual[6]

Relatório do Estado do Ambiente REA 2013 Portugal

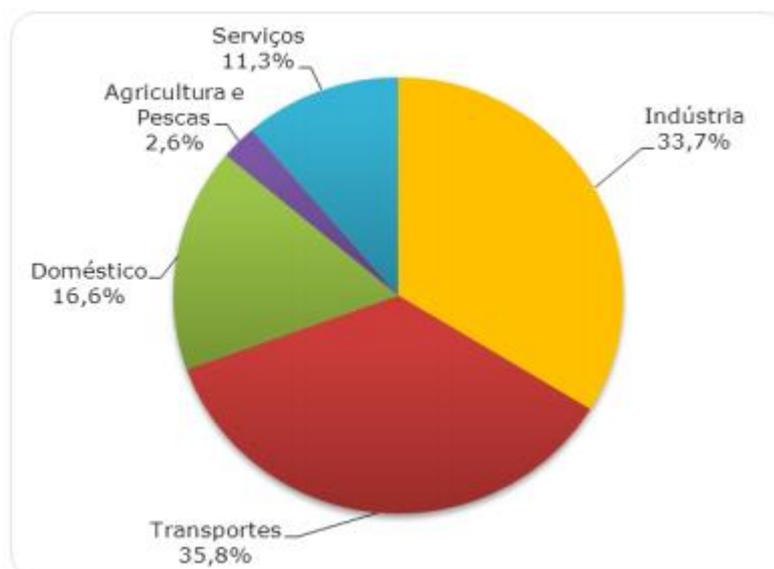


Figura 1-6: Consumos energético nas diferentes áreas

De forma a complementar a informação anterior na tabela 1-1 pode-se verificar quais os grandes consumidores, em Portugal, de energia elétrica.

Desde 1994 até 2012 o consumo de energia por parte dos consumidores não domésticos quase triplicou. O consumo ao nível da indústria, desde 1994 até 2006 aumentou de forma quase linear, mantendo-se irregular daí até 2012.

Em 1994 a indústria representava cerca de 46% do consumo, tendo perdido expressão (para cerca de 36% do consumo global) em 2010.

Tabela 1-1: Evolução do consumo anual[7]

Ano	Consumo de energia elétrica por tipo de consumo (kWh)						
	Total	Doméstico	Não doméstico	Indústria	Agricultura	Iluminação das vias públicas	Edifícios do Estado
1994	2 777.50	735.6	506.1	1 272.60	43.6	76.8	113.4
1995	2 916.10	756.9	545.5	1 334.70	51.2	79.8	116.9
1996	3 059.80	811.2	592.1	1 358.60	53	85	126.5
1997	3 208.80	833.2	636.5	1 427.50	56.1	91	130.2
1998	3 386.80	864.6	697	1 490.80	61.8	93.5	142.2
1999	3 595.80	932	764.5	1 537.60	68.3	99.4	157.3
2000	3 784.20	977.3	824.5	1 605.50	69.5	104.2	167.4
2001	3 912.20	1 025.30	872.4	1 617.80	75.3	110.4	175.6
2002	4 042.10	1 092.40	870.7	1 642.40	81.3	115.2	199.8
2003	4 188.10	1 131.60	917.6	1 669.30	85	127.4	214.8
2004	4 339.90	1 185.90	951.7	1 708.90	93.6	125.7	228.9
2005	4 477.50	1 260.80	995.1	1 702.20	97.9	134.2	241.5
2006	4 613.60	1 274.10	1 056.20	1 751.20	91.7	143.6	247.6
2007	4 711.80	1 314.90	1 078.80	1 772.50	97	149	251.5
2008	4 658.70	1 273.30	1 082.70	1 747.70	96.1	155.6	255.2
2009	4 615.00	1 342.50	1 094.20	1 622.10	93.3	158.3	258.3
2010	4 786.90	1 373.50	1 127.10	1 720.70	97	157.2	266
2011	4 654.5*	1 302.9*	1 132.8*	1 674.2*	92.9*	158.6*	255.5*
2012	4 482.3*	1 226.6*	1 175.9*	1 622.2*	95.4*	147.9*	179.8*

Consumo de energia elétrica *per capita*: total e por tipo de consumo

Fontes de Dados: DGEG/MEE

INE - Estimativas Anuais da População Residente

Fonte: PORDATA

Última atualização: 2014-05-21

As dificuldades económicas que a indústria nacional atravessa associadas à enorme competitividade existente no mercado, faz com que haja uma preocupação por parte das empresas para diminuir os custos com o produto final. Para tal é necessário diminuir todos os desperdícios.

A nível energético as perdas associadas aos cabos de distribuição de energia, as perdas dos transformadores, as quedas de tensão, a energia reativa (influencia diretamente o fator de potência, além dos custos associados na fatura de energia), as correntes e tensões harmónicas, entre outros são exemplo dos desperdícios que podem ser encontrados nas instalações industriais.

Todos estes aspetos tem o seu impacto quando se fala em eficiência energética, quanto mais importância se dá aos desperdícios maior será o rendimento da instalação em questão.

Outro aspeto relevante é o facto de, por vezes, as instalações elétricas não se encontrarem preparadas para alimentar novas cargas. Esta situação não se deve a possíveis erros no dimensionamento inicial, mas são resultado das alterações que se tem vindo a observar quer ao nível dos equipamentos quer no número de novos equipamentos instalados superior às previsões iniciais.

Tendo todos estes aspetos em conta, pretende-se com a realização deste projeto mostrar a importância da redução das correntes harmónicas, bem como o possível aumento da eficiência energética da instalação.

Tendo ainda em conta a importância atribuída nos dias de hoje, pelas empresas, aos processos de certificação, a compensação das correntes harmónicas pode ser ainda apresentada como uma mais valia. Deste modo, é demonstrada uma preocupação por parte da empresa não só com o meio ambiente (uma vez que a diminuição das correntes harmónicas implica uma diminuição do consumo global), mas também revela uma preocupação com os níveis da qualidade da energia elétrica (QEE) da instalação e os problemas daí resultantes e a forma de os evitar.

1.2 - Apresentação da Bosch Car Multimedia Portugal S.A.

O grupo Bosch encontra-se em Portugal desde 1911, data da abertura por parte de Gustavo Cudell da primeira loja Bosch.

Em 1960 abriu a unidade de Lisboa e somente após 28 anos é que foi adquirida a unidade de termodomésticos da marca Vulcano em Aveiro. A unidade de Braga é a principal fábrica da divisão Car Multimedia da Bosch e a maior empresa do grupo Bosch em Portugal, tendo iniciado a sua atividade em 1990. Em 2002 foi adquirido o complexo de Ovar que pertencia ao grupo Phillips.

Inicialmente o complexo de Braga era uma unidade produtiva de auto-rádios da marca Blaupunkt, tendo a marca sido vendida em 2009. Da reorganização da divisão, o negócio da empresa passou a estar focado no fornecimento de equipamentos de origem aos clientes da indústria automóvel, deixando assim para trás uma tradição de *aftermarket*.

De forma a trazer maior estabilidade e menor vulnerabilidade às oscilações do mercado automóvel, a empresa decidiu implementar de forma mais incisiva uma estratégia de diversificação dos seus produtos.

A sua atividade está centrada no desenvolvimento e fabrico de produtos eletrónicos, nomeadamente auto-rádios, sistemas de navegação para a indústria automóvel (tendo sido acrescentados produtos como *displays* de tecnologia inovadora), sensores de ângulo (para o sistema ESP) e unidades de cálculo de custos com portagens para camiões.

1.2.1. Proposta de valor

A vertente produtiva da empresa é complementada por serviços prestados pelo departamento de investigação e desenvolvimento e pelo centro de competências. O desenvolvimento mecânico e elétrico e a produção de amostras são vistos pelos clientes como um valor acrescentado.

Além destes aspetos é de salientar o trabalho levado a cabo pelo centro de assistência técnica e reparação e serviços de informática para a península ibérica, tendo-se tornado uma mais valia, nomeadamente com o desenvolvimento de soluções de apoio à produção.

Neste sentido, a empresa empenhou-se para se qualificar como fornecedor para a indústria automóvel, tendo obtido certificações em áreas essenciais como a Qualidade (ISO/TS 16949), o Ambiente (ISO 14001 e EMAS III) e a Higiene e Segurança (OHSAS 18001). Simultaneamente, a empresa investiu no desenvolvimento das suas competências e tornou-se *benchmark* na área da eletrónica.

De acordo com a publicação apresentada em julho deste ano pela prestigiada *Yole Développement*, (figura 1-7) a Bosch é um dos maiores produtores de *Micro-Electro-Mechanical Systems* [8], sendo que a produção deste tipo de equipamento tem vindo a evoluir ao longo dos anos.

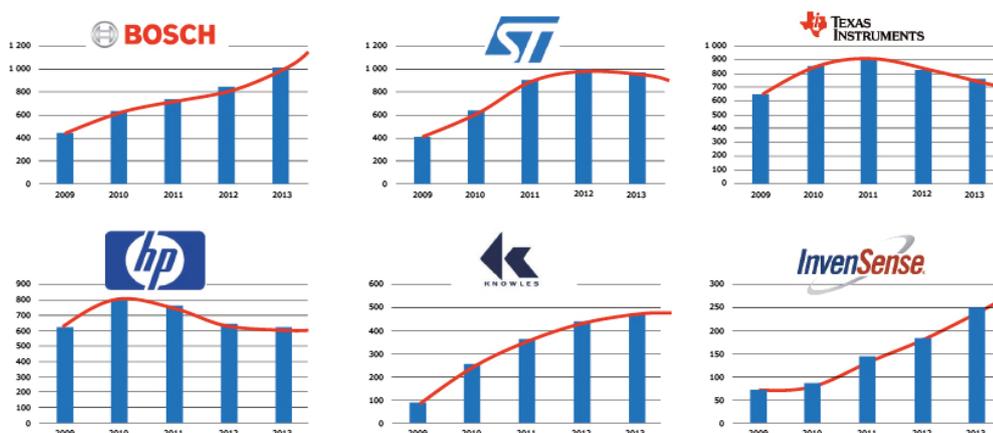


Figura 1-7: Evolução das vendas dos maiores produtores de *Micro-Electro-Mechanical Systems* [8]

1.3 - Objetivos

Por forma a melhorar a qualidade da energia elétrica na Bosch Car Multimedia Portugal S.A. pretende-se com esta dissertação apresentar uma proposta de melhoria viável para futura implementação.

Essa proposta encontra-se relacionada com a existência de correntes harmónicas na instalação, e deste modo pretende-se avaliar, por exemplo, a influência direta destas com as baterias de condensadores, nomeadamente o efeito provocado nos condensadores.

Existe um problema que já tinha sido detetado relacionado com o disparo de diferenciais, pretende-se avaliar a relação deste acontecimento, num ponto da instalação, com a existência de harmónicos.

Por fim, seria interessante analisar o ponto mais afetado pelas correntes harmónicas na instalação, apresentando uma proposta viável para melhoria do sistema.

1.4 - Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 7 capítulos.

No capítulo 1 foi apresentado o contexto desta dissertação, nomeadamente o seu enquadramento político-económico. Sendo este capítulo dedicado à introdução do tema desta dissertação. De seguida, no capítulo 2 será apresentado o estado da arte, sobre as frequências harmónicas.

O capítulo 3, apresenta os métodos aplicados nas medições efetuadas, nomeadamente níveis de corrente na instalação e a respectiva distorção harmónica, tendo em conta as normas aplicáveis.

Os casos de estudo serão apresentados no capítulo 4, sendo o capítulo 5 destinado à apresentação de resultados, e o capítulo 6 dedicado à discussão dos mesmos.

Por fim, o capítulo 7 incluirá as conclusões finais desta dissertação.

Capítulo 2

Influência das correntes harmónicas na qualidade da energia

Neste capítulo será apresentado uma breve introdução sobre a qualidade da energia eléctrica, para que posteriormente seja apresentado o nível de conhecimento adquirido e desenvolvido para a realização desta dissertação.

2.1 Introdução

Para a realização de um trabalho científico o ponto de partida é sempre o estado da arte, que consiste na recolha de informação relativa ao caso que se pretende analisar, no estudo de trabalhos realizados com base em referências de artigos científicos e no desenvolvimento de novas metodologias e novas abordagens. Esta etapa consiste num processo de aprendizagem e reflexão que permite aplicar um ponto de vista diferente que poderá vir a potenciar novas reflexões sustentadas por uma crítica estruturada.

2.2 Qualidade da energia eléctrica (QEE)

Com o aumento da exigência por parte dos consumidores industriais promovida pelo constante aumento da competitividade industrial, surgiu a necessidade de controlar os níveis de qualidade de serviço do fornecimento de energia.

O desenvolvimento de novos equipamentos para o sector eléctrico (nomeadamente instrumentação de corte de energia), que se tornaram mais sensíveis às flutuações dos níveis

10 Influência das correntes harmónicas na qualidade da energia

de corrente e tensão, fazem com que o controlo dos níveis de QEE sejam relevantes para o correto funcionamento da instalação industrial.

Torna-se também importante verificar a qualidade de energia a montante da instalação, pois devido à existência de cargas não lineares a jusante, irão existir deformações nas formas das ondas da tensão e da corrente.

Como postulado na norma NP EN 50160, a qualidade de energia elétrica é definida como “a ausência de qualquer perturbação que afete a operação de um qualquer equipamento recetor”. Para avaliar a QEE é necessário recorrer a indicadores de qualidade que podem ser consultados na mesma norma (outras normas podem ser consultadas, nomeadamente CEI e IEEE, entre outras.

A NP EN 50160 [9] realça a importância de:

- Frequência;
- Amplitude da tensão de alimentação;
- Variações da tensão de alimentação;
- Variações rápidas da tensão de alimentação;
- Amplitude das variações rápidas;
- Severidade do efeito de tremulação (flicker);
- Interrupções breves da tensão de alimentação;
- Interrupções longas da tensão de alimentação;
- Sobretensões temporárias entre os condutores ativos e a terra;
- Desequilíbrios das tensões de alimentação;
- Tensões harmónicas;

Entre outros.

A incerteza existente da causa e do causador que diminuem a QEE elevam os prejuízos económicos, quer em termos de equipamento danificado quer em termos de custos associados à paragem de linhas de produção. O problema das correntes harmónicas afeta a generalidade do sector industrial, tendo maior impacto na indústria de semicondutores, indústria de papel, indústria automóvel (soldadura, componentes), entre outros, nomeadamente indústrias onde o consumo energético é elevado.

A utilização de equipamentos que possuem sistemas de controlo baseados em componentes eletrónicos que se revelam mais sensíveis às perturbações, ou a utilização de equipamentos que influenciam a rede elétrica em termos de inserção e propagação de componentes harmónicas são das principais causas de diminuição da QEE.

O aumento da utilização da eletrónica de potência a nível industrial, tais como conversores eletrónicos, controladores lógicos programáveis, sistemas de retificação, variadores de velocidade e lâmpadas de descarga são as principais causas de deformação da forma de onda da corrente e que nos leva à problemática das componentes harmónicas nas instalações elétricas industriais.[10].

No entanto, a dificuldade de identificar as cargas ativas no sistema, bem como a densidade das suas componentes harmónicas torna o problema das distorções harmónicas bastante complexo (Das, 2002) [11].

2.3 Harmónicas

Tendo em conta que a função que caracteriza as frequências harmónicas é periódica, e que varia ao longo do tempo, recorre-se, para a sua análise, à transformada de Fourier, desenvolvida pelo matemático Jean Baptiste Fourier. Além de ter sido uma das primeiras técnicas aplicadas, proporciona uma análise individual de cada componente[12].

A série de Fourier, foi formulada sobre a hipótese de que qualquer função periódica não sinusoidal com frequência fundamental f pode ser expressa como a soma de infinitas funções periódicas sinusoidais com frequências múltiplas da fundamental [12][13].

A equação 2-1 mostra o cálculo da série de Fourier para uma função periódica $x(t)$.

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right)$$

Equação (2-1) [25]

onde, a_0 representa o valor médio da função periódica $x(t)$ e tanto a_n quanto b_n são os coeficientes da série, os quais se estendem até à n -ésima ordem harmónica.

Com o passar do tempo essa mesma série foi simplificada, tendo sido apresentada por Wakileh (2001) e Sankaran (2002) [14][12].

A expressão apresentada pode ser simplificada utilizando apenas os termos com senos quando a função que se encontra para análise for ímpar e simétrica com relação à origem, isto é, $f(-t) = -f(t)$. Caso contrário numa função par $f(-t) = f(t)$, apenas os termos com cossenos necessitam ser utilizados.

Existem casos onde a simetria aparece apenas em meio ciclo, isto é, $f\left(t \pm \frac{T}{2}\right) = -f(t)$, não apresentando por isso componente corrente contínua resultando na anulação de harmónicas de ordem par. Como mostrado, o método desenvolvido por Fourier é um dos mais empregues na extração de componentes harmónicas, porém não é o único.[15][16][17].

Harmónicas pares existem devido à presença da componente contínua causando assimetria do sinal, enquanto as ímpares existem em todas as instalações eléctricas e são causadoras de problemas de energia.

A produção de energia eléctrica é feita através de frequências constantes, nomeadamente à frequência de 50 Hz, no caso de Portugal. A forma de onda resultante deste processo é

praticamente sinusoidal. Por outro lado, quando aplicada a uma carga não linear a onda de corrente resultante passa a ser não sinusoidal.

2.4 Harmônicas num sistema trifásico

Para simplificar o estudo de um sistema trifásico, este é transformado em três sistemas monofásicos, quer seja para o estudo de tensões quer para o estudo de correntes, denominados por sequência positiva, negativa e homopolar ou sequência zero [12].

Estas três sequências são compostas por três formas de onda sinusoidais que se encontram desfasadas 120° entre elas, assumindo um sistema equilibrado com rotação de fase normal [12].

Assumindo uma sequência de fases ABC, com sentido anti-horário, caracteriza a sequência positiva, tal como mostrado na figura 2-1.

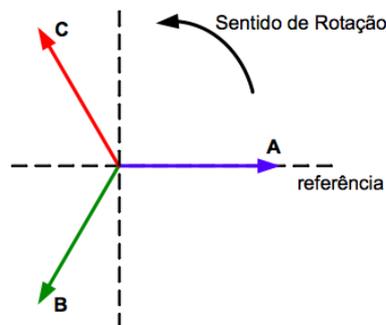


Figura 2-1: Conjunto de sequência positiva

Já a sequência negativa é caracterizada pelas três sequências de fases com o mesmo desfasamento mas possui uma rotação no sentido dos ponteiros do relógio, figura 2-2.

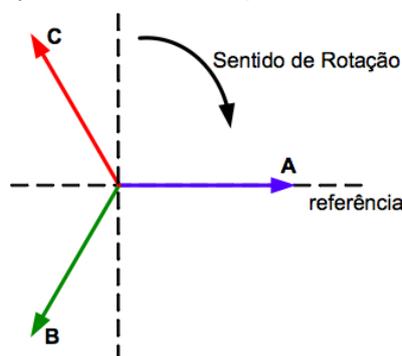


Figura 2-2: Conjunto de sequência negativa

A sequência homopolar possui de igual modo três formas de onda sinusoidais, porém, todas em fase, figura 2-3.

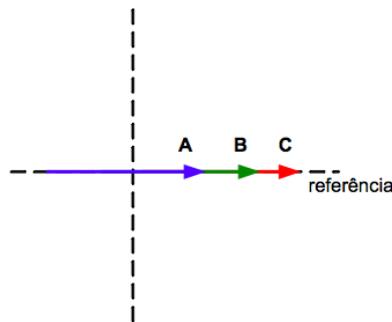


Figura 2-3: Conjunto de sequência zero

As sequências de fase podem ser determinadas através da ordem das componentes harmónicas. Pode-se verificar ainda que as harmónicas múltiplas de 3 são de sequência zero e, como apresentado por Dugan et al. (2004)[18], num sistema trifásico em estrela a quatro condutores, as harmónicas de sequência zero ao circularem pelo condutor neutro podem contribuir para as distorções nas tensões do sistema.

2.5 Indicadores de medição de correntes harmónicas

O “espectro harmónico” é constituído pela decomposição de um sinal nas suas componentes harmónicas, sendo representado por um gráfico de barras no domínio da frequência. Teoricamente, o espectro harmónico de um sinal deformado tenderia para infinito. Na prática, geralmente, limita-se ao número das componentes harmónicas a serem medidas/analizadas (por volta da ordem número 30). Esta limitação deve-se ao facto dos sinais de ordem superior raramente serem significativos a ponto de perturbarem o correto funcionamento de uma instalação eléctrica [19].

O indicador mais utilizado para medir a distorção harmónica relacionado com um sinal, é a Taxa de Distorção Harmónica proveniente do inglês *Total Harmonic Distortion* (THD), podendo este estar relacionado com a onda de tensão (equação 2-2), ou com a onda de corrente (equação 2-3). Este indicador é expresso em percentagem sendo o quociente da raiz quadrada da soma dos quadrados das tensões eficazes de cada componente harmónica pelo valor eficaz, isto é:

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1}$$

Equação (2-2)

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

Equação (2-3)

Para avaliar a qualidade da onda de corrente, utiliza-se a fórmula 2-3 substituindo-se apenas os valores referentes à tensão pelos valores da corrente.

Como tal, para um valor elevado da THD implica um maior afastamento da forma de onda sinusoidal, implicando uma maior deformação da onda.

Para o cálculo da Total Demand Distortion (TDD), é aconselhável a utilização de um período entre 15 a 30 minutos [26], para quantificar a distorção neste período utiliza-se a equação 2-4:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_l}$$

Equação (2-4)

2.6 Causas das correntes harmónicas

Nas instalações elétricas industriais existem dois tipos de cargas, as lineares e as não lineares. As cargas lineares são caracterizadas por absorver da rede elétrica valores de corrente proporcionais à tensão que lhes é aplicada (equação 2-5), ou seja:

$$V = Z \times I$$

Equação (2-5)

Mantendo deste modo a forma de onda de tensão praticamente sinusoidal, ainda que possa haver desfasamento angular entre elas, como é o caso de uma carga reativa (condensador ou bobina), onde haverá um desfasamento entre a tensão e a corrente, no entanto, o comportamento ainda será linear.

As cargas não lineares são caracterizadas por solicitar uma corrente com forma de onda não sinusoidal no tempo. De acordo com o teorema de Fourier, apresentará uma soma de ondas sinusoidais com uma frequência de valor múltiplo da componente fundamental (componentes harmónicas) [20].

As distorções harmónicas identificadas no passado encontravam-se associadas à construção das máquinas elétricas, tendência que se inverteu com a inclusão de díodos, *mosfets*, tirístores, entre outros, na produção de equipamentos eletrónicos.

O recurso à eletrónica de potência e à microeletrónica tem evoluído significativamente, elevando a sensibilidade dos equipamentos.

Estes equipamentos devido à sua versatilidade geram correntes e tensões harmónicas provocadas pelas constantes comutações entre estados. Um destes casos é observável nos variadores eletrónicos de velocidade, que permitem ajustar a velocidade do motor de acordo

com as necessidades da máquina ou do utilizador. Além de promoverem a eficiência, estes introduzem na rede correntes harmônicas que causam deformação nas formas de onda [21]

O aumento de utilização destes equipamentos na indústria tem sido crescente tal como pode ser observado no gráfico da figura 2-4:

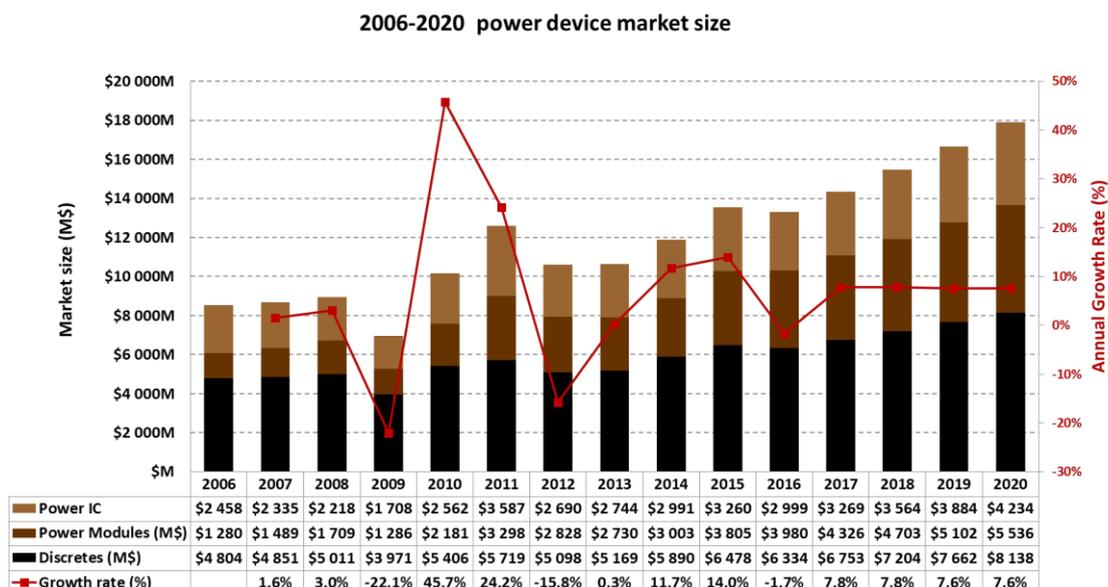


Figura 2-4: Valores anuais das vendas de equipamentos de electrónicos [22]

Para 2020 prevê-se um aumento de vendas de 58%, comparativamente aos valores de 2013, na utilização de equipamentos na gama entre 400 e 900V, figura 2-5.

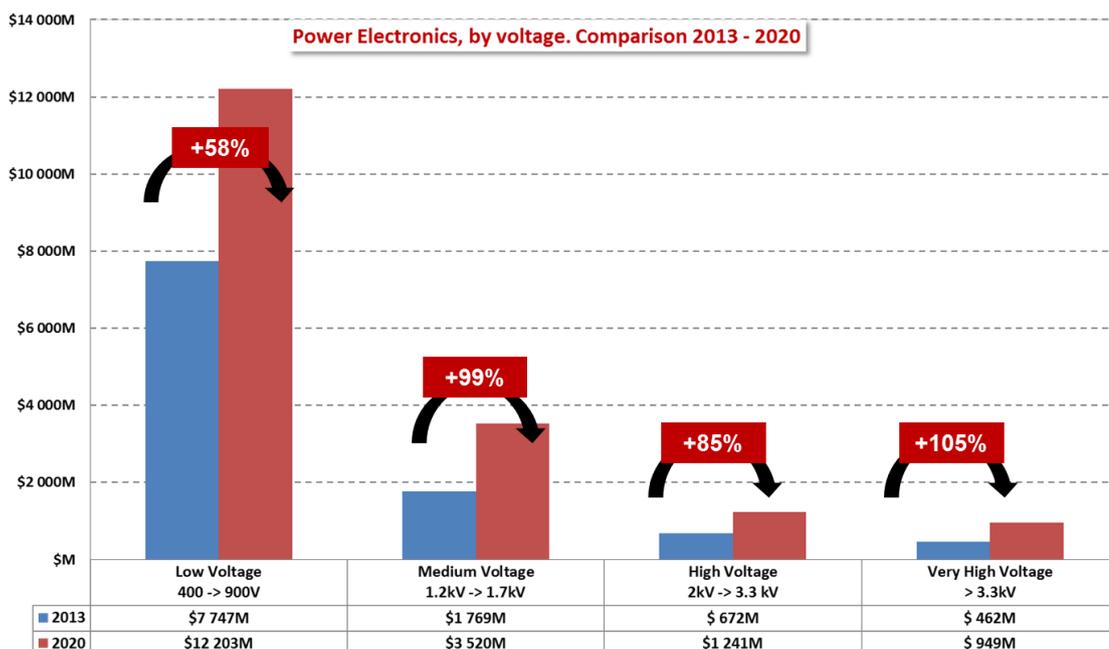


Figura 2-5: Previsão de vendas para as diferentes potências [22]

16 Influência das correntes harmônicas na qualidade da energia

A inserção destes equipamentos poderá, em determinadas situações, influenciar o nível da qualidade da energia, provocando um acréscimo das perdas no sistema. As variações constantes no fator de potência, desequilíbrios entre fases, e as correntes harmônicas provocadas por cargas não lineares são a base do problema.

Atualmente, nas instalações elétricas industriais, grande parte da energia consumida percorre um dispositivo eletrônico de potência antes de ser utilizada. Por exemplo, no caso de um motor de corrente contínua ou de corrente alternada que se encontre acoplado a um variador eletrônico de velocidade (VEV), a solicitação energética feita pelo motor vai ser afetada pela distorção harmônica causada pelo VEV, antes de ser utilizada.

Todos estes componentes de eletrônica de potência possuem dois modos de funcionamento, um de condução (interruptor fechado) e outro de bloqueio (interruptor aberto). A passagem entre estes estados ideais deveria ser instantânea, no entanto tal não é possível, uma vez que no curto espaço de tempo entre comutações é produzida uma corrente não sinusoidal. Por sua vez, estas correntes irão circular nas instalações e em equipamentos que conduzirão a quedas de tensão com evolução igualmente não sinusoidal, que quando sobrepostas adequadamente com a tensão da rede a tornam também não sinusoidal.

Outros exemplos de cargas não lineares presentes em instalações industriais são os compensadores estáticos reativos e os fornos elétricos de arco, entre outros.

A figura 2-6 demonstra a forma de onda absorvida por algumas cargas não lineares, bem como o espectro harmônico e os valores da THD_i.

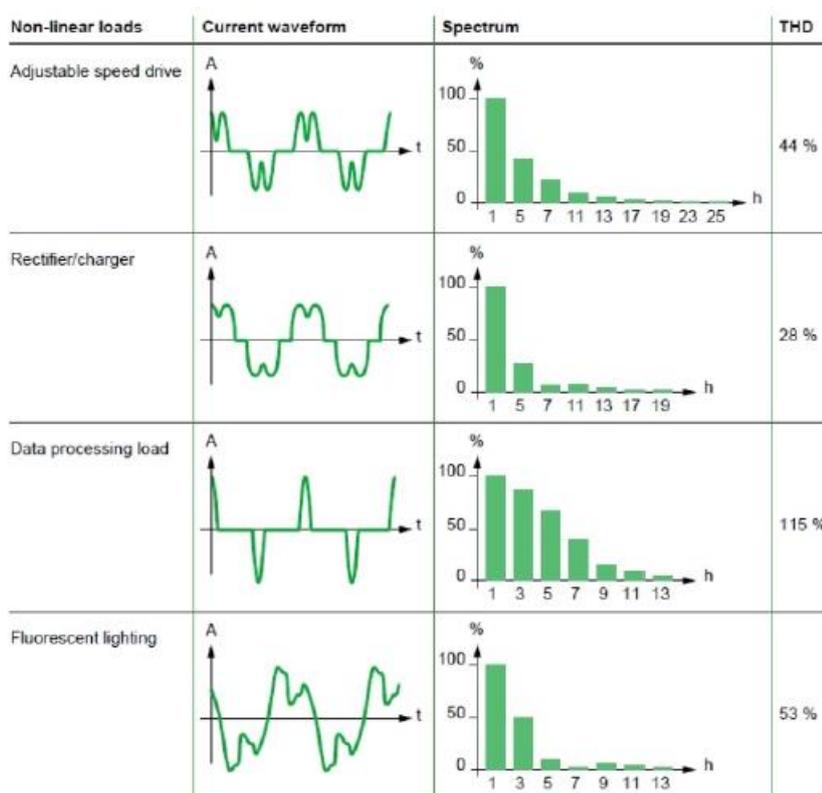


Figura 2-6: Espectro harmônico de cargas não lineares

2.7 Consequências das correntes harmônicas nos equipamentos de uma instalação elétrica industrial

As correntes harmônicas além de interferirem com o correto funcionamento dos sistemas de proteção, tal como será apresentado mais à frente neste capítulo, cada equipamento reage de forma diferente à sua presença.

Os principais efeitos observados nas instalações elétricas são os seguintes:

- Possibilidade de aumentar/amplificar os valores de correntes harmônicas por efeito das ressonâncias em consequência do paralelo ou da série de reactâncias;
- Ao nível da eficiência existe um decaimento causado pelas correntes harmônicas, na produção de energia, na transmissão e no consumo;
- Diminuição da vida útil dos equipamentos;
- Défice no funcionamento natural do sistema/instalação elétrica.

Além destes aspetos, a presença de correntes harmônicas irá afetar a diminuição do fator de potência. Esta diminuição irá fazer com que haja um aumento das perdas da instalação, devido aos trânsitos de potência e diminuindo, desta forma, a eficiência da mesma. [23].

Equação referente ao fator de potência para ondas sinusoidais (equação 2-6):

$$FP = \frac{\text{Potência Ativa da carga (W)}}{\text{Potência fornecida pelo gerador (VA)}} \langle \Rightarrow \rangle$$
$$\langle \Rightarrow \rangle \frac{\text{Potência Ativa da carga (W)}}{\text{Potência aparente da carga (VA)}} = \cos\varphi$$

Equação (2-6)

Tendo em conta os valores eficazes da tensão e corrente decompostas em série de Fourier, a partir da definição do fator de potência, pode-se chegar à expressão(2-7)[20][24]

$$FP = \frac{\cos\varphi}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

Equação (2-7)

Pode-se, deste modo, concluir que um valor elevado referente às correntes harmônicas, que implica uma diminuição do fator de potência, irá resultar num aumento na corrente total das redes de distribuição de energia elétrica, podendo sobrecarregar as linhas de transmissão e transformadores e assim prejudicar a estabilidade e aproveitamento dos sistemas elétricos.

2.7.1. Bateria de condensadores

A tentativa de utilização eficiente de energia leva as empresas a apostarem em ações que promovam não só o consumo eficiente, mas também manterá manutenção de um nível tão elevado quanto possível da qualidade de energia que circula na instalação. Esta situação é valorizada pelas empresas de distribuição de energia que aplicam taxas em caso de incumprimento de determinadas condições.

Um destes casos é a preocupação existente associada à utilização de energia reativa. Para que os níveis do fator de potência se mantenham iguais ou superiores ao exigido pelas empresas de distribuição, é necessário, em determinadas situações, serem instaladas baterias de condensadores.

A utilização de condensadores para que se faça a correção do fator de potência, poderá resultar no aparecimento de um efeito de ressonância. Um circuito ressonante é constituído por um condensador em paralelo com uma carga indutiva em determinadas condições. O efeito resultante desta combinação é a amplificação de sinais de uma determinada gama de frequência. Se existe uma carência, por parte da instalação, de energia reativa, isso diz-nos que as cargas que estamos a alimentar são de natureza indutiva. Como a compensação do sistema é feita com recurso a baterias de condensadores (carga capacitiva), poder-se-á acabar por criar um circuito ressonante. Desta condição advém uma amplificação das correntes harmônicas que podem resultar na diminuição do período de vida útil dos condensadores. Em casos extremos poderá queimar o condensador.

Também o nível de distorção na onda de tensão aumenta as perdas energéticas no dielétrico dos condensadores. Esta perda pode ser expressa pela fórmula 2-8:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

Equação (2-8)[25]

2.7.2. Transformadores

Tendo em conta que as instalações elétricas das indústrias são muitas vezes alimentadas por mais do que um transformador, é importante verificar qual o efeito das correntes harmônicas nestes equipamentos.

O principal efeito verificado nos transformadores é a diminuição do período de vida útil provocado pelos aquecimentos excessivos devido às perdas energéticas.

Nos transformadores, quando estes são alimentados por uma onda de tensão sinusoidal, devido à saturação e histerese do circuito magnético verifica-se que, o fluxo resultante é sinusoidal, no entanto a onda de corrente de magnetização apresenta-se. Supondo um

transformador em vazio, para que o fluxo seja sinusoidal e atendendo à curva de saturação e histerese teremos as equações 2-9 e 2-10 [25]:

$$v_1 = -e_1 = -E_m \sin(\omega t) = N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

Equação (2-9)

$$\phi = - \int \frac{e_1}{N_1} dt = E_m \frac{E_m}{N_1 \omega} \cos(\omega t)$$

Equação (2-10)

A figura 2-7 descreve a curva de magnetização de um transformador e a relação resultante entre o fluxo e a corrente de magnetização. Esta corrente de magnetização é, em geral, rica em harmônicos ímpares - 3º, 5º, 7º, 9º e 11º. Caso a ligação do transformado seja em estrela/triângulo os terceiros harmônicos e os seus múltiplos são eliminados. Os 5º e 7º harmônicos podem, no entanto, introduzir distorções significativas. Contudo, uma vez que a corrente de magnetização é uma parcela muito pequena da corrente que passa por um transformador em carga, esta poluição acaba por assumir um valor bastante reduzido [25].

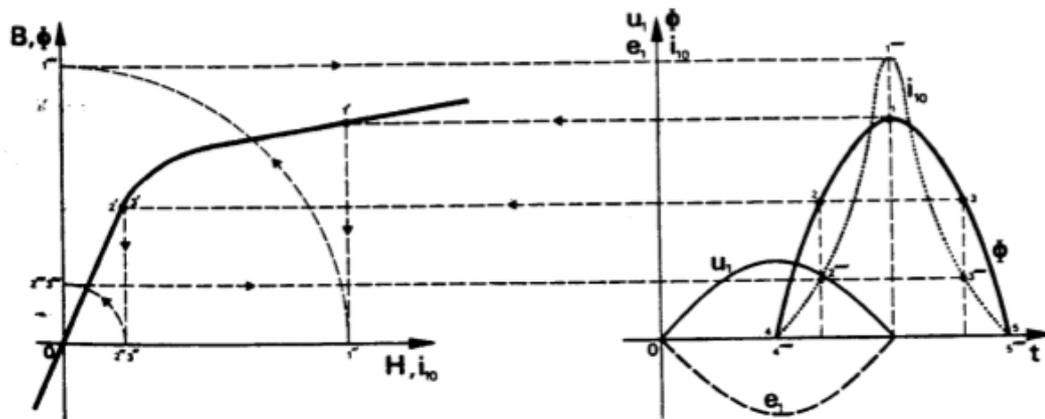


Figura 2-7: Distorção da corrente de magnetização em transformadores

Parte dessas perdas podem ainda estar relacionadas com a requisição feita pelas cargas, que necessitam de um determinado nível de corrente para o seu funcionamento, no entanto, devido às correntes harmônicas, fazem com que esta requisição de corrente seja maior. Podem-se verificar ainda efeitos de ressonância entre a indutância do transformador e as capacidades do sistema.

Na situação em que o transformador se encontra dimensionado em função da potência aparente da instalação (total ou parcial), a presença de correntes harmônicas faz com que a

folga dimensionada sofra uma diminuição, uma vez que o valor eficaz da corrente será superior ao dimensionado.

As correntes harmônicas causam ainda vibrações nos enrolamentos e desgaste do isolamento entre lâminas.

Por outro lado, as correntes de Foucault resultantes da magnetização do transformador (perdas magnéticas), são proporcionais ao quadrado da frequência.

Relativamente às harmônicas de tensão, são prejudiciais do mesmo modo que as anteriores, no entanto, as suas consequências encontram-se relacionadas com perdas entre duas lâminas consecutivas.

2.7.3. Máquinas rotativas

A distorção ao nível da tensão é prejudicial para as máquinas rotativas na medida em que quando, por exemplo, o motor é excitado, estarão a ser injetadas no estator correntes de frequências elevadas. Situações tais como binários pulsantes, ruído, aquecimento excessivo e vibrações são provocadas pelas componentes harmônicas da corrente.

Já nos alternadores, as harmônicas de corrente, estão diretamente relacionadas com as perdas óhmicas suplementares nos enrolamentos principais e nos enrolamentos amortecedores. As vibrações no veio dos alternadores, provocadas por binários oscilatórios podem muitas vezes ser provocados pela interação entre as correntes harmônicas e o campo magnético fundamental, provocando o aumento da fadiga mecânica das máquinas.

Já nos motores assíncronos o aumento das perdas por efeito Joule são provocadas pelo sobreaquecimento dos enrolamentos do estator. Por sua vez, as vibrações e o aparecimento de binários de torção no veio da máquina são originados devido à distribuição assimétrica da corrente induzida nas barras rotóricas. [20]

2.7.4. Equipamentos de proteção

Também os equipamentos de proteção presentes nas instalações elétricas são afetados pela presença de harmônicas. Mais uma vez, devido ao aquecimento provocado pelas correntes harmônicas, ou até mesmo o aumento do campo elétrico que existiria sem a interferência das mesmas, faz com que diferenciais e dispositivos termomagnéticos disparem.

Os relés de proteção operam por vezes indevidamente, sendo que o contrário também se verifica (existe um impedimento da sua operação).

Em locais onde exista um conjunto elevado de computadores, impressoras, fotocopiadoras, e outros aparelhos eletrônicos, o risco de disparo de uma proteção é elevado, uma vez que as harmônicas apesar de apresentarem correntes com valores eficazes pequenos, possuem elevados valores de pico (fator de crista elevado).

2.8 Sumário do capítulo 2

Este capítulo teve como base o estudo das correntes harmónicas e a sua influência na qualidade da energia elétrica.

Tendo sido apresentado o nível de consumo mundial, este valor remete não só para a necessidade de aumento das preocupações de cariz ambiental, mas também mostra que se deve apostar na diminuição dos desperdícios e no aumento da qualidade de energia.

Sendo as correntes harmónicas uma fonte de desperdício, torna-se importante a sua redução/eliminação, para tal, neste capítulo, encontra-se explicado de que forma estas correntes são originadas e como afetam determinados equipamentos que estão presentes em todas as instalações industriais, nomeadamente os transformadores, máquinas rotativas e os equipamentos de proteção.

O próximo capítulo é responsável pela apresentação das normas que permitem classificar os níveis de distorção das correntes harmónicas.

Capítulo 3

Monitorização

Neste capítulo serão apresentadas as normas aplicadas ao método de monitorização e medição dos níveis de correntes harmónicas numa instalação elétrica.

As medições foram efetuadas com recurso a equipamentos de medida devidamente calibrados. Neste capítulo será apresentada uma breve introdução sobre cada um deles e sobre o *software* que foi utilizado para a apresentação de resultados.

3.1 Introdução

Para o estudo das correntes harmónicas numa instalação industrial existem várias considerações apresentadas por diversas organizações. De forma a implementar um conjunto de medidas *standard* para que todos se possam reger pelos mesmos valores, desde fabricantes de equipamentos, consumidores, empresas de fornecimento de energia, entre outros, foram implementados alguns limites.

As primeiras recomendações aqui apresentadas foram recolhidas do *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, denominada IEEE std (*standard*) 519 de 1992[26]. Além desta norma serão ainda apresentadas as considerações fornecidas pela Comissão Internacional de Eletrotecnia (*International Eletrotechnical Comission*) - IEC 61000-X-X.

A IEC apresenta ainda várias considerações relacionadas com a compatibilidade eletromagnética, e entre, vários assuntos relacionados com a qualidade de energia. Contudo, apenas serão apresentados os aspetos relacionados diretamente com as correntes harmónicas.

Note-se que ambas as normas são aplicáveis para uma frequência de 50 Hz (sistema português).

3.2 Normas aplicáveis

3.2.1. IEEE Std. 519-1992

O IEEE Std. 519-1992 além de ter como objectivo inculir responsabilidades aos consumidores e às concessionárias da rede elétrica pretende também criar um *standard* para o controlo de correntes e tensões harmónicas. Para tal, definiu-se o *Point of Common Coupling* (PCC) [26], que se refere à interface entre as fontes e as cargas. Este ponto não se encontra bem definido nem na norma nem nos documentos que se seguiram a esta, a definição do PCC torna-se assim suscetível a diferentes interpretações. Com a verificação dos valores da THD no PCC pode-se determinar a interferência da instalação na rede, bem como a QEE fornecida pela concessionária. Para tal, definiram-se os seguintes limites para as correntes harmónicas que podem ser injetadas no sistema elétrico. Estes valores foram escalonados tendo em conta o tipo de consumidor, tabela 3-1.

Tabela 3-1: Dados recomendados em percentagem pela IEEE Std 519-1992 para a classe de tensão: $V_n \leq 69$ kV

I_{SC}/I_L	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

De forma sumária, pode-se definir a IEEE Std. 519-1992 como um consenso de diretrizes e práticas recomendadas que podem ser aplicadas às concessionárias e seus consumidores para controlar e/ou minimizar o impacto das harmónicas geradas por cargas não lineares.

3.2.2. IEC 61000-2-2

Outra norma que serve como base para o estudo é a IEC 61000-2-2, tal como a IEEE esta limita os níveis de distorções harmónicas de tensão para os consumidores em que a sua alimentação é feita entre 240V e 450V (tanto para sistemas monofásicos como para sistema trifásicos) [27], tabela 3-2.

Tabela 3-2: Níveis de distorção harmónica individual para sistemas elétricos de baixa tensão conforme o IEC 61000-2-2.

Harmónicas não múltiplas de 3			Harmónicas múltiplas de 3		
Ordem ímpar h	Harmónica de Tensão (%)	Ordem par h	Harmónica de Tensão (%)	Ordem h	Harmónica de Tensão (%)
5	6.0	2	2.0	3	5.0
7	5.0	4	1.0	9	1.5
11	3.5	6	0.5	15	0.3
13	3.0	8	0.5	21	0.2
17	2.0	10	0.2	>21	0.2
19	1.5	12	0.2		
23	1.5	>12	0.2		
25	1.5				
>25	0.2 + 1.3 x (25 / h)				

3.2.3. IEC 61000-3-4

Uma vez que a instalação que se encontra para estudo possui vários equipamentos na sua área produtiva, a recomendação IEC 61000-3-4, apresenta os vários limites associados a equipamentos cuja corrente nominal se encontra entre os 16 A e os 75 A [28], tabela 3-3.

Tabela 3-3: Valores recomendados pela IEC 61000-3-4 para as correntes harmónicas

Ordem h	Corrente harmónica (%)	Ordem h	Corrente harmónica (%)
3	21.6	19	1.1
5	10.7	21	0.6
7	7.2	23	0.9
9	3.8	25	0.8
11	3.1	27	0.6
13	2.0	29	0.7
15	0.7	31	0.7
17	1.2	33	0.6

3.2.4. EN 50160

A norma europeia EN 50160 determina os procedimentos utilizados pelas concessionárias europeias de forma a garantir uma boa qualidade da tensão que alimenta os seus consumidores.

Tal como se pode verificar pela tabela 3-4 que se segue os níveis desta norma são coincidentes com os níveis implementados pelo IEEE.

Tabela 3-4: Valores recomendados pela EN 50160 para as harmónicas de tensão

Harmónicas não múltiplas de 3				Harmónicas múltiplas de 3	
Ordem ímpar h	Harmónica de Tensão (%)	Ordem par h	Harmónica de Tensão (%)	Ordem h	Harmónica de Tensão (%)
5	6.0	2	2.0	3	5.0
7	5.0	4	1.0	9	1.5
11	3.5	6-24	0.5	15	0.3
13	3.0			21	0.2
17	2.0				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				
>25	0.2 + 1.3 x (25 / h)				

Para que seja mais prático controlar e manter o sistema elétrico estável foram desenvolvidas uma diversidade de normas e/ou recomendações. Tal como demonstrado neste capítulo através das normas supracitadas existe uma maior rigidez para as cargas instaladas ao nível industrial do que para as cargas instaladas pelo consumidor doméstico. No entanto, nos dias de hoje o consumidor comum possui na sua habitação um número elevado de equipamentos tais como, televisores, computadores, placas de indução, entre outros, que afetam a QEE. De acordo com a evolução e com o aumento do consumo de energia por parte dos consumidores comuns poderá num futuro próximo esta situação ser revista implicando um maior controlo por parte destes.

Com a inclusão de painéis fotovoltaicos e com a introdução de veículos elétricos no mercado e tendo em conta que em parte das residências já se começa a verificar o aparecimento de baterias de energia reativa para compensar as requisições por parte dos motores, é de prever que, no futuro, a QEE possa sofrer deformações/alterações como consequência dos novos hábitos de vida da população em geral

3.3 Instrumentos de medida utilizados

Para realizar as medições, a empresa utiliza um *software* de controlo denominado GridVis

Basicamente o software GridVis é uma interface gráfica interligada com cada aparelho de medição UMG universal.

Permite uma visão geral de toda a rede de energia elétrica e serve também como propósito de parametrização dos instrumentos de medição.

Este Software permite que todos os valores estejam disponíveis no modo de medição *on-line* e posteriormente sejam gravados numa base de dados. É também possível a visualização dos dados através de gráficos, quer em tempo real ou valores armazenados.

De uma forma geral o software GridVis permite:

- Visualização dos valores de medição
- Leitura automática dos instrumentos
- Armazenamento dos dados numa base de dados
- Apresentação gráfica dos valores de medição on-line
- A configuração dos aparelhos de medição
- Parametrização, visualização, gestão e análise de dados

É utilizado numa infinidade de aplicações, como:

- O desenvolvimento de sistemas extensivos de gestão de energia
- Visualização de fornecimento de energia
- Documentação da qualidade de energia por um período definido de tempo
- A análise das causas de falhas
- Gestão de centro de custo, ou seja, cálculo simples e precisa do custo de eletricidade
- Estabilização do fornecimento de energia através da função de alarme quando os valores limite são excedidos por exemplo, sobretensão ou de curto prazo interrupção
- Melhoria da qualidade de energia, por exemplo, análise harmónica para detecção de anomalias
- A análise do perfil de carga, por exemplo, prognóstico de consumo para as negociações do contrato de energia elétrica

A nível local a finalidade deste está relacionada com a contabilização dos consumos e medição de grandezas como as correntes, potências solicitadas para avaliar o comportamento da sua instalação e prever/projetar soluções de forma a evitar problemas e alterações de forma a responder às solicitações dos consumidores internos.

Atualmente encontram-se instalados 74 analisadores (Janitza) nos vários quadros de distribuição que a empresa possui. 5 dos analisadores (UMG 511) encontram-se dedicados aos

PTs e os restantes equipamentos (UMG 604) encontram-se localizados em pequenos quadros de linhas e em quadros de distribuição. As grandes diferenças entre os dois equipamentos é que o modelo UMG 511 possui um display a cores onde facilmente se podem consultar localmente os vários valores de medições instantâneas, o desfasamento entre as fases (graficamente), o espectro harmónico, diagrama fasorial entre muitos outros. Este possui ainda mais resolução quando comparado com o modelo UMG 604. A comunicação entre estes e o servidor é feita através da rede *ethernet*.

Através deste software (GridVis) podem-se configurar as medições que pretendemos armazenar na base de dados e a periodicidade das mesmas.

Cada analisador pode possuir uma configuração distinta dos restantes. Por exemplo, para um analisador que se encontre num PT, é indispensável que armazene a informação sobre a temperatura interna, enquanto que nos quadros de uma linha de produção essa necessidade não é essencial.

Para as medições pontuais foi ainda disponibilizado outro equipamento, o FLUKE 435 II. Uma das vantagens deste equipamento é que possui pinças flexíveis com um diâmetro que permite englobar vários cabos a alimentar a mesma fase, nos quadros de distribuição.

3.4 Sumário do capítulo 3

Este capítulo é a base para a realização do caso de estudo pois permitiu identificar onde (PCC) e como as distorções harmónicas podem ser medidas, isto é, foi apresentada a metodologia proposta para lidar com a situação das correntes harmónicas nas instalações eléctricas.

Este torna-se também importante na parte de compreensão dos resultados pois, tendo como base as normas associadas às correntes harmónicas aqui apresentadas será possível avaliar o nível de distorção harmónica presente na instalação.

Capítulo 4

Caso de estudo

Neste capítulo pretende-se apresentar os casos de estudo que foram desenvolvidos durante o período de realização desta dissertação. Para tal, foi realizada uma análise de montante para jusante da instalação, tendo-se iniciado nos PTs, passando pelos quadros de distribuição e terminando na identificação das cargas mais “poluentes”.

4.1 Caso de estudo 1 - Identificação dos níveis de correntes harmónicas na instalação elétrica.

Tendo em conta da norma IEEE std 519-1992, o ponto inicial para a calculo da taxa de distorção harmónica da instalação foi a determinação do PCC. Este ponto numa instalação industrial é determinado pela separação das cargas não lineares das restantes cargas [26] podendo ser suscetível a diferentes interpretações. Recentemente, uma equipa do IEEE dedicada ao estudo desta norma [29][30], definiu-o PCC como *“The Point of Common Coupling (PCC) with the consumer/utility interface is the closest point on the utility side of the customer’s service where another utility customer is or could be supplied. The ownership of any apparatus such as a transformer that the utility might provide in the customer’s system is immaterial to the definition of the PCC”*.

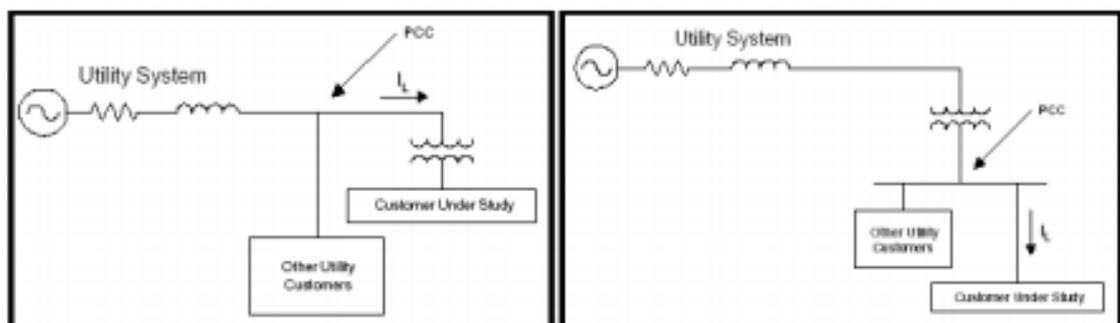


Figura 4-1:Exemplo de identificação do PCC de uma instalação[31].

Na figura 4-1 apresenta-se um exemplo de identificação do PCC de uma instalação.

Assim, e tendo em conta que a Bosch possui uma subestação dedicada, assumiu-se que o ponto entre a concessionária e o consumidor se encontra situado na saída do secundário do transformador. Uma vez que se pretende estudar toda a instalação, e visto que, a subestação alimenta três PTs internos, foram verificados os níveis de distorção harmónica na saída do secundário de cada um dos transformadores existentes na instalação.

A estrutura de cada um dos PTs é a seguinte:

- O PT 1 é composto por um transformador ativo e outro de reserva;
- O PT 2 possui 3 transformadores em funcionamento, sendo que dois deles se encontram a funcionar em paralelo;
- O PT 3 possui um único transformador.

Através de um conjunto de medições e com recurso ao histórico de dados implementado pretende-se neste primeiro caso determinar a área que apresenta maiores níveis de distorção harmónica.

4.2 Caso de estudo 2 - Identificação dos equipamentos que produzem níveis elevados de correntes harmónicas.

Após a análise efetuada na rede de baixa tensão, e de identificados os pontos onde os valores das correntes harmónicas são mais elevadas, torna-se necessário localizar os equipamentos que mais influenciam esses valores. Para tal, com recurso aos analisadores instalados na rede, procedeu-se à recolha de informação que permitisse determinar quais os equipamentos que mais influenciam os níveis de correntes harmónicas.

4.3 Caso de estudo 3 - Influência da bateria de condensadores na produção de correntes harmónicas

Tal como foi referido no capítulo 2 a bateria de condensadores é uma fonte de harmónicos.

Na instalação elétrica da empresa cada transformador possui uma bateria de condensadores associada.

Visto que o PT1 alimenta grande parte das cargas indutivas (motores de compressores, *chillers*, motores das colunas de exaustão, entre outros), optou-se por verificar neste ponto da rede a influência da compensação reativa. A bateria encontrava-se num modo de funcionamento em que não conseguia efetuar a correção do fator de potência na sua totalidade uma vez que possuía dois condensadores danificados.

Além de verificar o nível de correntes harmónicas quando não se encontra em funcionamento, com recurso ao histórico de dados armazenados foi possível efetuar uma comparação relativa à relação entre a compensação do fator de potência para valores pré

estabelecidos pela empresa ($\cos\phi$ 0.97) com o fator de potência máximo possível com a utilização de apenas 75% de carga capacitiva.

A ação corretiva foi efetuada no dia 23 de julho das 08:00 horas, altura em que a bateria de condensadores foi desligada até sensivelmente às 09:00 do mesmo dia.

Para verificar o período de vida útil dos condensadores foi utilizada a data de colocação em serviço dos mesmo.

A bateria de condensadores é composta por 8 condensadores de 25 kvar. A gestão de quais, ou de quantos condensadores serão ativados é determinada através de um controlador apresentado na figura 4-2.

Foi determinado, no controlador, qual o valor aceitável para o $\cos\phi$ da instalação, sempre que este valor sofrer alterações, devido às requisições das cargas, mediante a capacidade disponível são acoplados ou desacoplados condensadores.

Deste modo, a fatura mensal de energia reativa cobrada pelo distribuidor de energia é nula exceto em casos esporádicos devido à avaria de condensadores em que não é possível fazer a compensação necessária.



Figura 4-2: Controlador do fator de potência instalado na bateria de condensadores do PT1

4.4 Caso de estudo 4 - Determinação dos níveis de distorção harmónica na área produtiva

Tendo sido determinado o ponto mais afetado da instalação, decidiu-se dar outro rumo ao estudo das correntes harmónicas. Outro problema que se verifica na instalação encontra-se na área produtiva. Devido ao disparo intempestivo da instrumentação de corte e proteção, que poderá ser fruto da existência de correntes harmónicas, a qualidade do serviço de

fornecimento de energia é afetada, acarretando custos elevados resultantes da danificação de componentes e equipamentos e, em última instância, da paragem das linhas de produção.

O PT2 alimenta as linhas produtivas. Como referido anteriormente os dois transformadores que se encontram em paralelo alimentam dois quadros de distribuição do piso 0 de produção (denominados por Quadro A e Quadro B), enquanto que o outro transformador alimenta dois quadros que se encontram no piso 2 (denominados por Quadro C e Quadro D).

Pretendeu-se determinar qual dos quatro quadros apresenta maiores distorções harmónicas para que posteriormente se possa realizar uma análise pormenorizada e individualizada às saídas do mesmo.

4.5 Determinação dos níveis de distorção harmónica nas saídas do quadro que apresenta maiores distorções harmónicas.

De modo a identificar quais as linhas mais afetadas pela distorção harmónica presente no quadro determinado no ponto anterior, realizaram-se medições a todas as suas saídas. Dada a quantidade e os diferentes modos de operação das linhas (existência de 3 turnos rotativos), foi realizado um plano de medições por um período de 24 horas para cada saída, de modo a verificar as diferentes variações que ocorrem englobando os 3 modos de operação.

4.6 Sumário do capítulo 4.

De forma a responder a todos os objectivos propostos no capítulo 1, desenvolveram-se os cinco casos de estudo aqui apresentados.

Tendo em conta a informação presente nos dois capítulos anteriores procurou-se, através da medição em vários pontos da rede, determinar as áreas mais fragilizadas pelas correntes harmónicas, bem como determinar as principais cargas responsáveis por estas.

Capítulo 5

Resultados

A apresentação de resultados encontra-se dividida em duas partes, a primeira relacionada com os serviços auxiliares da produção (produção de ar comprimido, central de aquecimento, máquinas de frio, etc), a segunda associada às linhas de produção. Inicialmente verificou-se a zona mais afetada pelas distorções harmónicas. Para que fosse possível estabelecer um padrão de consumo configuraram-se os analisadores já existentes junto dos transformadores para adicionarem a THD da corrente ao seu conjunto de medições, tendo sido estes armazenados na base de dados já existente. As tabelas 5-1 e 5-2 apresentam os valores mensais médios da THD (tensão e da corrente) registados para os diferentes transformadores, presentes nos PTs.

Tabela 5-1: Valores médios em percentagem da THD_i durante o ano de 2014

Mês	THD _i [PT1]- [%]	THD _i [PT2TR1]- [%]	THD _i [PT2TR2]- [%]	THD _i [PT2TR3]- [%]	THD _i [PT3]- [%]
Fevereiro	20,7	18,7	18,9	8,0	9,2
Março	21,0	18,5	18,7	8,3	9,0
Abril	19,7	18,5	18,8	9,0	8,5
Mai	20,0	17,7	18,1	8,3	7,6
Junho	16,8	17,3	17,7	8,6	8,0

Tabela 5-2: Valores médios em percentagem da THD_u durante o ano de 2014

THD _u [PT1]- [%]	THD _u [PT2TR1]- [%]	THD _u [PT2TR2]- [%]	THD _u [PT2TR3]- [%]	THD _u [PT3]- [%]
4,9	2,9	2,8	2,4	2,4

O transformador do PT 1 apresenta quer na distorção da onda de tensão quer na distorção da onda de corrente valores mais elevados do que os restantes transformadores, talvez porque neste, encontram-se associadas cargas que exigem correntes elevadas para o seu funcionamento e que durante esse período existe uma grande variação ao nível da frequência (trabalham com várias frequências, nem sempre funcionam a 50 Hz).

Segundo a norma, para determinar a razão entre a corrente de curto-circuito (I_{SC}) e a carga acoplada a cada um dos transformadores (I_L), é recomendado que haja um histórico das correntes máximas num período de 12 meses que antecedem esta verificação. A I_{SC} é determinada pela corrente de curto-circuito do PCC, enquanto que a I_L , é a média dos valores máximos registados no período de 12 meses.

Tendo sido obtido o valor desta razão e consultando a tabela 3-1estão apresentados os valores máximos aceitáveis para a nossa instalação na tabela 5-3.

Tabela 5-3: Valores referentes aos limites da instalação tendo em conta os limites impostos pela norma resultantes da razão entre I_{SC} e I_L

	PT1	PT2			PT3
		Transformador	Transformador	Transformador	
		1	2	3	
I_{SC}	37,5 A	25 kA	25kA	37,5 kA	25 kA
I_L	1423 A	815 A	820 A	1954 A	709
TDD	12,7 %	9,4 %	9,8 %	5,4 %	6.1 %
Limite	8 %	8 %	8 %	5 %	8 %

Através da tabela 3-1 e dos resultados apresentados na tabela 5-3 é ainda possível determinar os valores máximos aceitáveis para os harmónicos de corrente para os vários transformadores. Para tal foi recolhido o espectro harmónico destes e é apresentado de seguida nas figuras 5-1a 5-5.

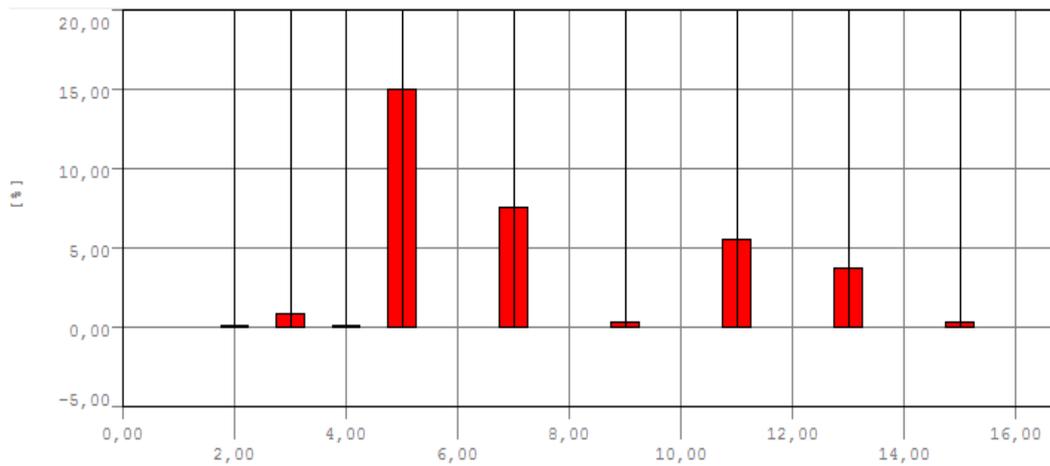


Figura 5-1: Espectro harmônico da corrente do transformador do PT1

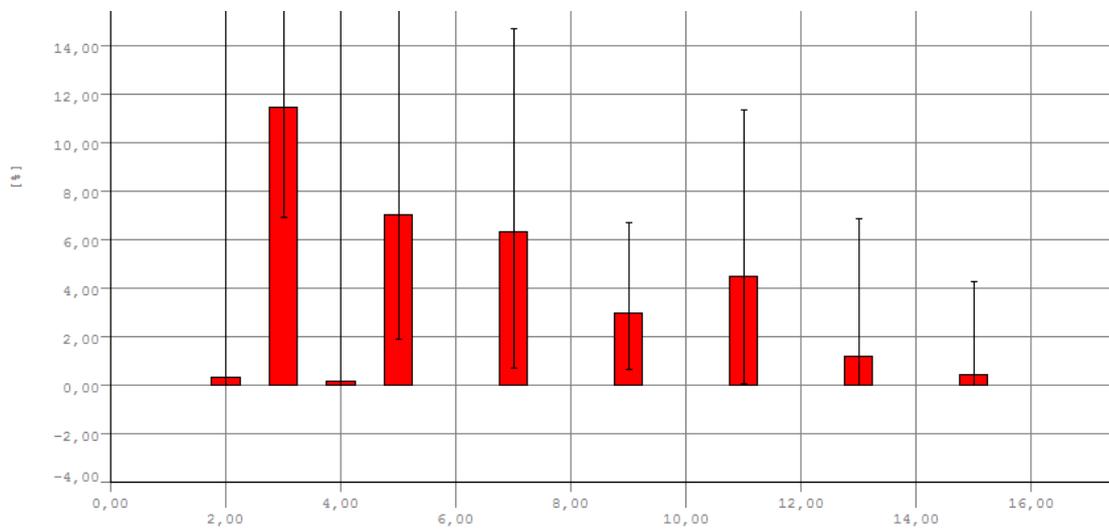


Figura 5-2: Espectro harmônico da corrente do transformador 1 do PT2

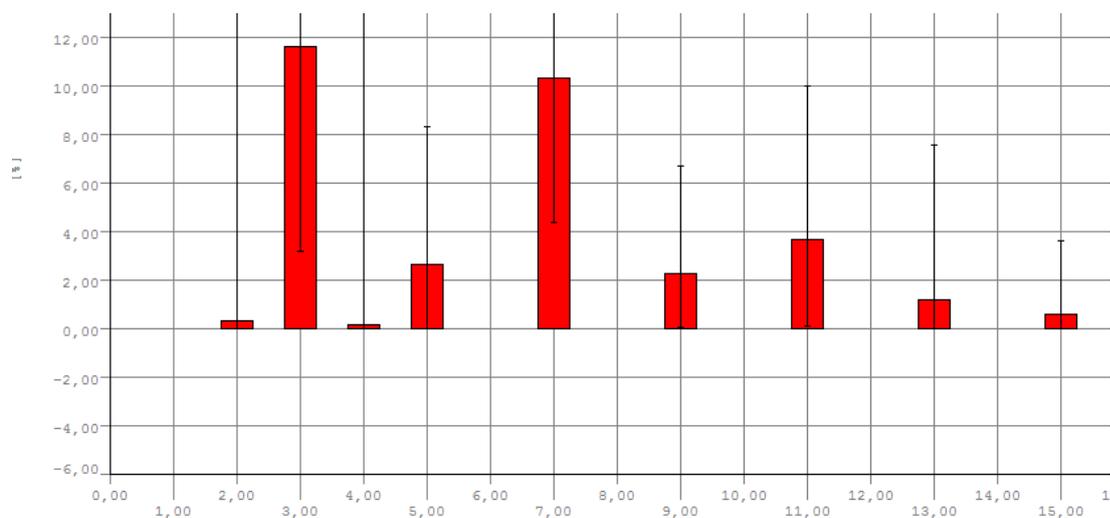


Figura 5-3: Espectro harmônico da corrente do transformador 2 do PT2

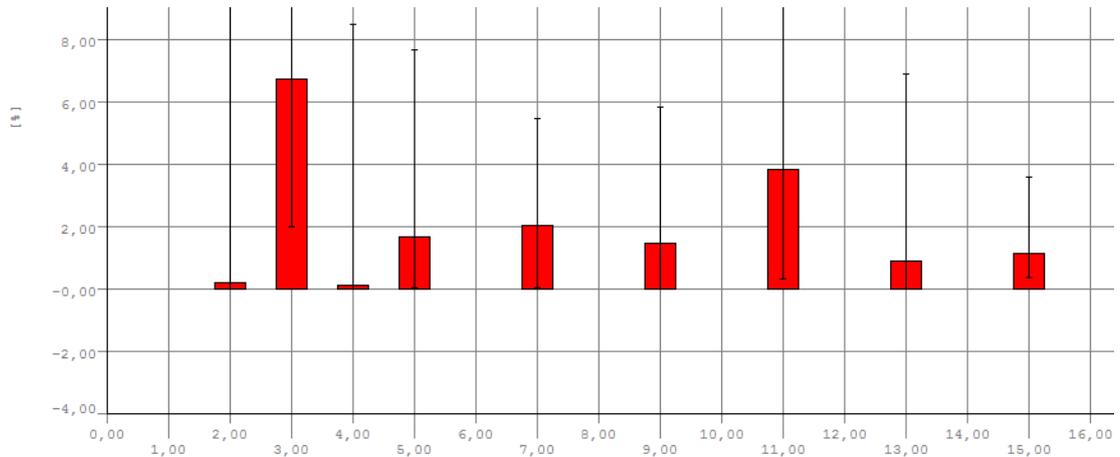


Figura 5-4:Espectro harmónico da corrente do transformador 3 do PT2

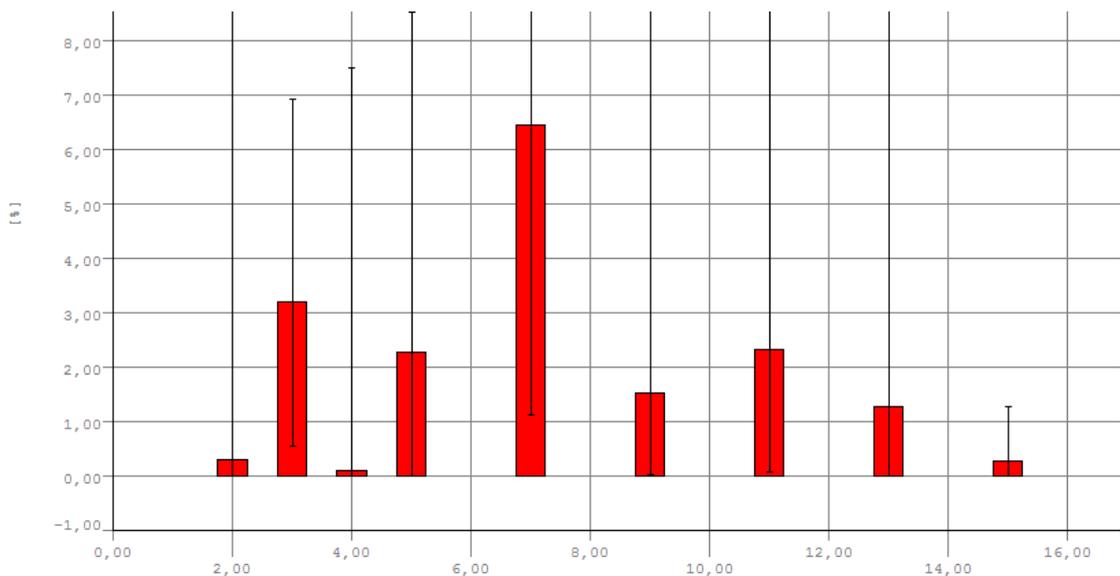


Figura 5-5:Espectro harmónico da corrente do transformador do PT3

Dado que o estudo incide sobre os transformadores, seria neste ponto pertinente verificar qual o valor do fator K associado a cada um dos transformadores. Este fator é utilizado no dimensionamento de transformadores de forma a mostrar a potência máxima que um transformador pode fornecer na presença de correntes harmónicas. O fator K foi dado diretamente pelos analisadores tendo por base a formulação matemática 5-1:

$$K = \frac{I_{pico}}{I_{rms} \times \sqrt{2}} = \frac{FC}{\sqrt{2}}$$

Equação (5-1)

Onde K representa o fator de desclassificação, I_{pico} , refere-se ao valor de pico da forma de onda da corrente, sendo que o valor eficaz da corrente é representado por I_{rms} . A razão entre estes dois valores resulta o fator de crista (FC). Para determinar a potência máxima do transformador tem-se que 5-2:

$$S_{máximo} = \frac{S_{nominal}}{K}$$

Equação (5-2)

Através do *software* de gestão de dados obtiveram-se os valores do fator K (tabela 5-4):

Tabela 5-4: Dados referentes ao cálculo do fator K e respetiva potência

	PT 1	PT 2 TR1	PT2 TR 2	PT2 TR 3	PT3
Fator de Crista	1.51	1.75	1.76	1.58	1.53
Fator K	1.07	1.25	1.24	1.12	1.08
$S_{nominal}$	1600	1000	1000	1600	1000
$S_{máximo}$	1502	809	806	1431	924

O fator de crista típico das correntes absorvidas pelas cargas não-lineares é muito superior a 2 pode tomar valores iguais a 1,5 ou 2, chegando até 5 nos casos críticos.

Um fator de crista muito elevado significa sobrecargas pontuais consideráveis. Estas sobrecargas, detetadas pelos dispositivos de proteções, podem ser a origem dos disparos intempestivos. [32]

Tendo em conta os resultados obtidos além de se ter verificado qual o PT mais afetado pelas correntes harmónicas, poderá ser contabilizada a interferência destas na potência disponível nos transformadores.

Cada um dos PTs possui uma bateria de condensadores para a compensação do fator de potência, de modo a que seja evitada a cobrança dos valores de consumo de energia reativa por parte do fornecedor de energia. Tal como abordado no capítulo 2 as baterias de condensadores influenciam os níveis de correntes harmónicas da instalação, procedendo-se por isso à verificação deste efeito.

Foi ainda referido anteriormente que as correntes harmónicas estão relacionadas com a diminuição do período de vida útil dos condensadores. Foi detetado que a bateria do PT1 não se encontrava a corrigir na totalidade o fator de potência, antes que este facto implicasse um aumento mensal da fatura energética, realizou-se uma ação de manutenção corretiva para anular esta situação. Foram detetados dois condensadores danificados que foram retirados e substituídos por elementos novos. Para que seja possível determinar no futuro o período de vida útil dos mesmos registou-se no condensador a data de instalação dos mesmos.

Após realizada esta ação retiraram-se os dados para que fosse possível analisar as alterações na taxa de distorção harmónica, tendo sido possível verificar que, a contribuição

devido aos efeitos de ressonância por parte da bateria de condensadores eleva os valores médios da THD. Tendo em conta que a intervenção teve início às 8:15 sensivelmente, através da tabela resumo (tabela 5-5) apresentada é possível verificar a diminuição da THD da corrente.

Tabela 5-5: Valores obtidos para a THD durante a ação de manutenção

Time	THDi L1 média[%]	THDi L1 min[%]	THDi L1 máx[%]
7:00	12,842	12,119	13,58
7:15	12,973	12,152	13,537
7:30	13,037	12,251	13,512
7:45	12,443	11,866	13,15
8:00	12,367	11,377	13,073
8:15	12,155	11,24	12,661
8:30	10,227	8,975	12,523
8:45	9,564	8,641	10,223
9:00	10,848	9,239	13,356
9:15	12,533	11,958	13,211
9:30	13,301	12,341	14,087
9:45	13,225	12,427	14,003
10:00	13,271	12,566	14,061

Contudo, o aumento da correção do fator de potência e a necessidade da existência da bateria de condensadores é apresentada no gráfico da figura 5-6. É possível através da análise gráfica verificar que na situação de inexistência da bateria de condensadores o $\cos \varphi$ rondaria os 0,92, implicando um custo acrescido na fatura mensal de energia.

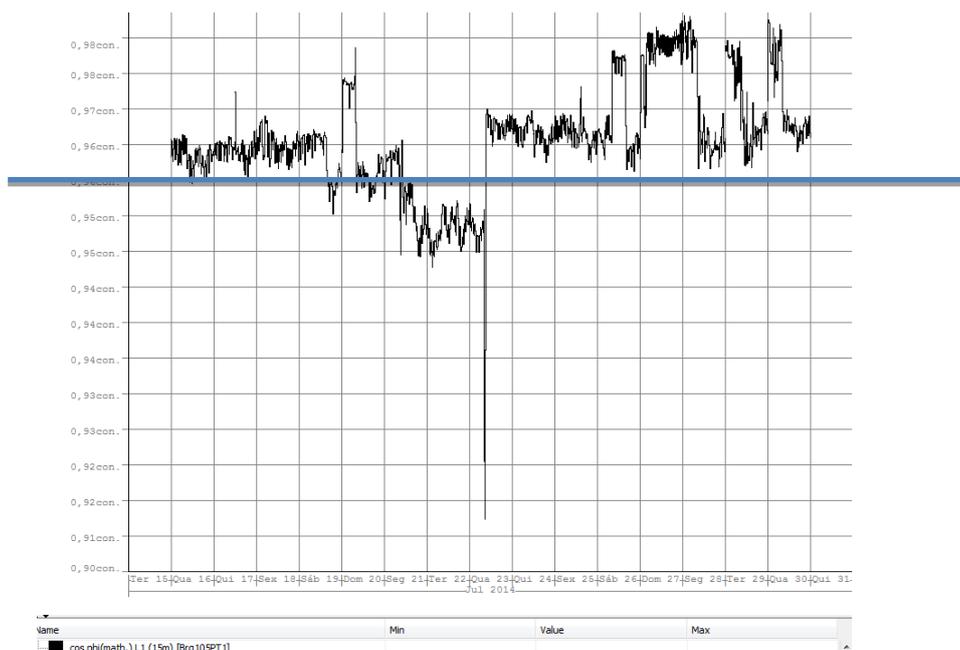


Figura 5-6: Gráfico da variação do $\cos \phi$ no PT1 durante a manutenção

Tendo sido avaliado qual o PT que possui a maior distorção harmónica, e tendo sido já apresentada a contribuição da bateria de condensadores para o seu aumento, falta identificar quais as cargas que juntamente com a bateria de condensadores mais influenciam esta distorção.

Tendo em conta as características e o regime de funcionamento de determinadas cargas realizaram-se medições para a verificação da influência destes equipamentos com a distorção harmónica apresentada no PT1.

Processo de ar comprimido.

Existem atualmente quatro compressores alimentados pelo PT1 para a produção de ar comprimido, sendo que a gestão destes é realizada de forma automática através de um controlador. Apenas dois se encontram em funcionamento, um é responsável por manter os níveis de ar comprimido num determinado valor pré-definido enquanto que o outro que possui um VEV, e entra em funcionamento quando a requisição de ar comprimido é elevada e torna-se necessário aumentar a pressão, uma vez que um só compressor não seria capaz de o fazer. Estes são equipamentos que funcionam a uma frequência fixa excetuando o que possui VEV, fazendo com que com estas variações aumentem a taxa de distorção harmónica.

Analisou-se qual dos dois compressores possui uma THD maior, tendo-se comprovado que o Compressor 3 (Kaeser, ESD 351), possui uma THD muito superior quando comparada com o outro compressor, figuras 5-7 e 5-8.

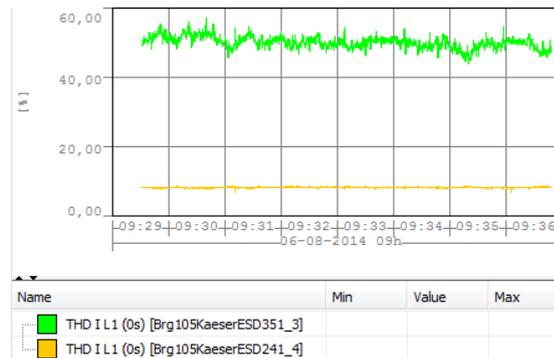


Figura 5-7: Gráfico da THD_i dos compressores

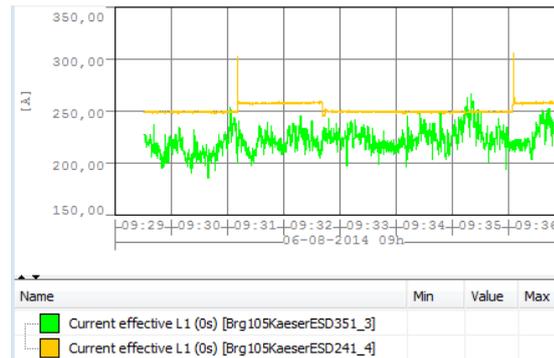


Figura 5-8: Gráfico da corrente dos compressores

Sistema de refrigeração

Outro processo problemático é o sistema de refrigeração de ar que é realizado através de *chillers*, cada um deles dedicados a determinadas zonas.

Existem 5 *chillers*:

- *Chiller* 1, 2 e 3 dedicados à área produtiva
- *Chiller* 104 e o *chiller* 102 dedicados aos edifícios 104 e 102, respetivamente.

A gestão deste equipamentos tal como acontece no ar comprimido é feita de forma automática, através de um software de gestão, Building Managemnt System (BMS), da Siemens. Verificou-se que o *chiller* que apresentava valores de THD na corrente mais elevada foi o *chiller* número 2, figuras 5-9 e 5-10.

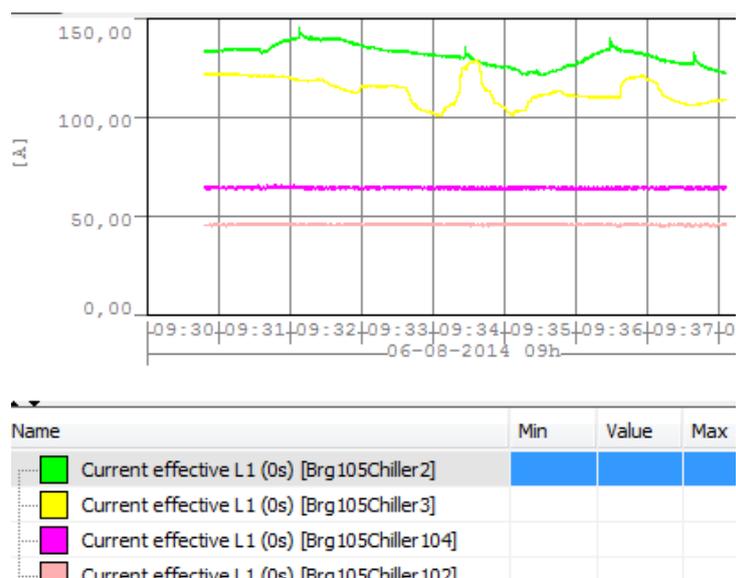


Figura 5-9: : Gráfico da corrente dos chillers

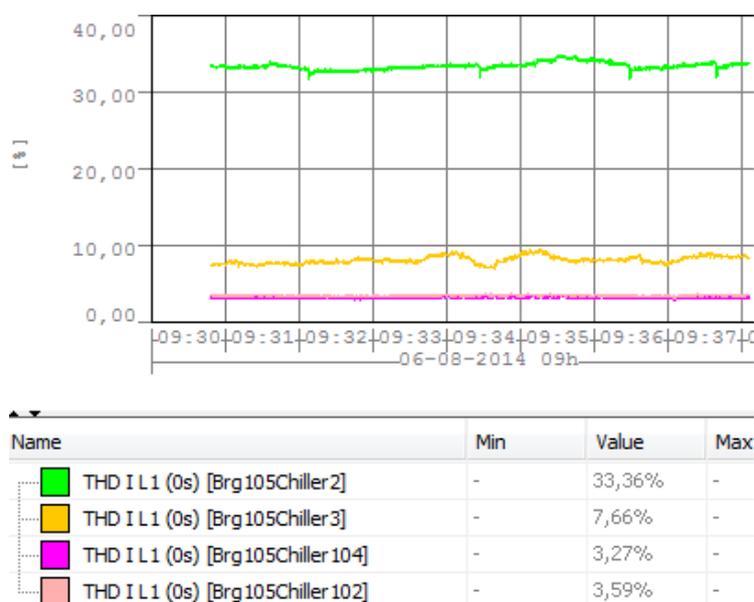


Figura 5-10: Gráfico da THDi dos chillers

Em paralelo, e tendo sido verificado que a área onde se encontram os serviços de apoio à produção é afetada por um valor elevado de distorção harmónica, pretendeu-se verificar os níveis de distorção harmónica juntos dos quadros que alimentam a área produtiva. Com vista a determinar qual dos quadros de apoio à produção possui uma maior influência nas correntes harmónicas, com o auxílio dos analisadores de rede implementados nesses quadros obtiveram-se os valores de corrente, THD da corrente e harmónicos de corrente.

O registo médio mensal dos valores da THD_u , THD_i e da corrente são apresentados nos gráficos 5-1 a 5-3:

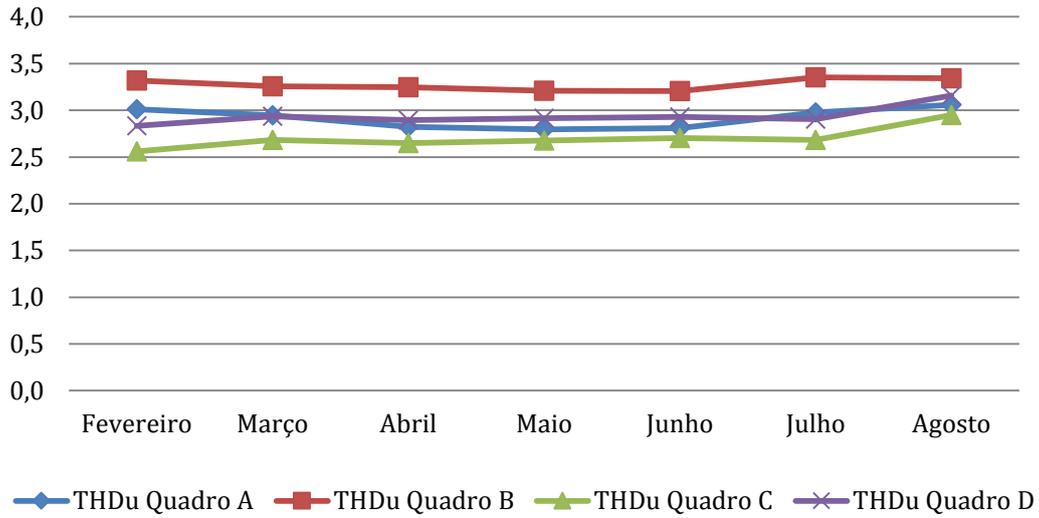


Gráfico 5-1: Média de valores mensais dos diferentes valores da THDu dos quadros de distribuição

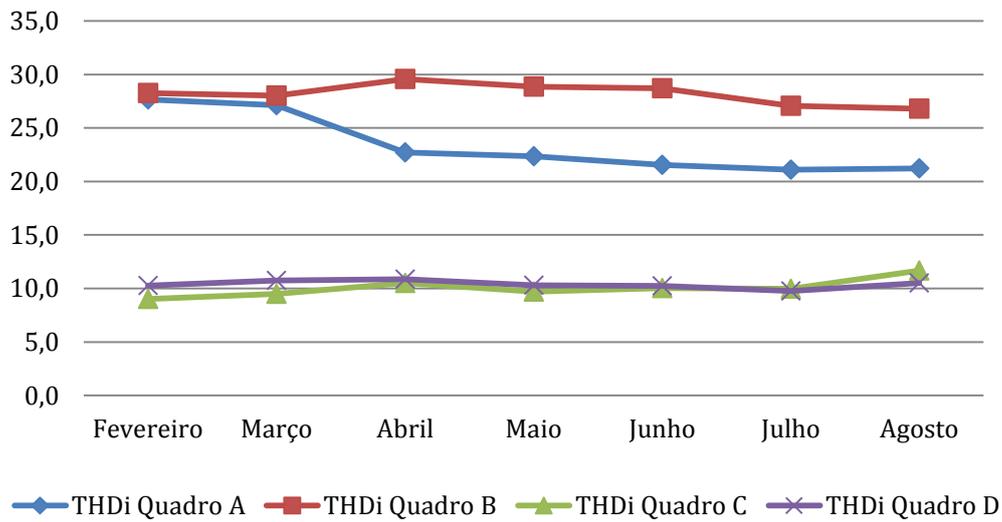


Gráfico 5-2: Média de valores mensais dos diferentes valores da THDi dos quadros de distribuição

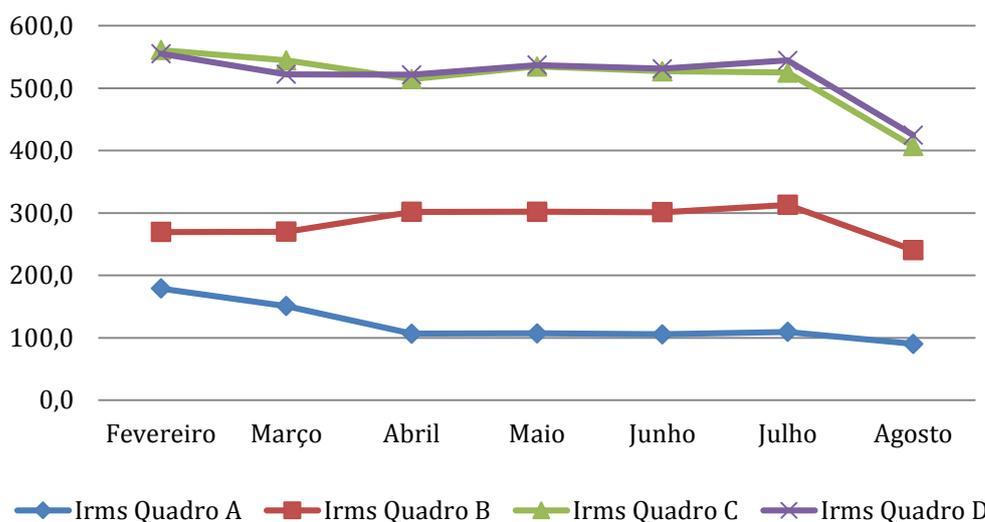


Gráfico 5-3: Média de valores mensais dos diferentes valores da corrente dos quadros de distribuição

Após a análise numérica de cada uma das taxas de distorção verificou-se que o Quadro B é o mais afetado, segundo a tabela 5-6.

Tabela 5-6: Valores das diferentes taxas de distorções harmônicas (média de valores entre Fevereiro e Agosto de 2014)

	Quadro A	Quadro B	Quadro C	Quadro D
THDu (%)	2,9	3,2	2,7	2,9
THDi (%)	24,8	26,3	9,8	10,2
TDD (%)	23	25	12	12

Para que seja possível verificar essa influência de forma mais detalhada instalou-se o analisador FLUKE 435 II, em cada uma das saídas desses quadros por forma a determinar quais as linhas/saídas que possuem valores mais elevados de distorção harmônica.

Tendo em conta que o funcionamento de algumas linhas se encontra influenciado não só pelo tipo de produto que se encontra em produção, mas também pelo turno, colocou-se o analisador a efetuar as medições por um período de 24 horas.

Com este estudo além de se terem verificado a influência das linhas, verificou-se ainda a existência de saídas que possuem correntes de neutro elevadas, em alguns casos, sendo superiores às correntes de fase.

São apresentados na tabela 5-7 as linhas mais afetadas pelas correntes de neutro elevadas.

Tabela 5-7: Dados da corrente das diferentes saídas do quadro B

Saída	Corrente L1N	Corrente L2N	Corrente L3N	Corrente
	Méd.	Méd.	Méd.	NG Méd.
B 1.1	8,6	10,6	9,3	13,2
B 1.8	11,9	12,8	9,9	10,2
B 1.11	3,9	9,8	5,5	6,2
B 1.12	6,5	10,0	9,4	11,6
B 1.13	8,4	14,4	12,8	13,0
B 1.14	6,2	16,0	4,5	13,7
B 2.1	5,1	1,2	4,2	4,2
B 2.2	4,0	2,1	8,9	7,3
B 2.6	6,7	6,9	7,4	1,9
B 2.7	4,8	5,3	5,2	2,9
B 2.10	8,8	7,4	11,0	11,0
B 2.12	35,9	29,6	32,6	30,7
B2.13	12,0	6,6	12,4	12,3
B 2.14	14,3	24,4	13,6	13,7
B 2.15	9,5	11,4	15,6	10,4
B 2.16	22,9	12,5	15,7	21,6
B 3.2	24,0	23,4	23,1	0,6
B 3.3	11,0	10,9	10,0	10,2
B 3.4	23,0	25,2	25,0	22,5
B 3.6	22,2	22,5	19,7	5,4
B 3.7	20,2	20,7	18,6	20,3
B 3.10	9,2	7,7	7,8	3,3
B 3.11	7,8	7,8	5,4	3,5
B 3.13	18,3	15,5	15,5	0,3
B 3.16	8,0	7,6	17,3	15,4

Este acontecimento poderá estar relacionado com o facto de em cargas não lineares, determinadas correntes harmónicas ímpares, nomeadamente os múltiplos ímpares da terceira harmónica (3x50Hz), não se anularem, mas, ao invés disso, adicionam-se ao neutro.

Em sistemas com muitas cargas monofásicas, a corrente de neutro pode de facto exceder a corrente de fase. O perigo aqui é o aquecimento excessivo, porque não há disjuntor ou fusível no circuito do neutro para limitar a corrente como há nos condutores de fase. Corrente excessiva no neutro pode também causar quedas de tensão maiores do que o normal entre o neutro e a terra [33]

Outra possibilidade está relacionada com o desequilíbrio entre fases. De seguida são apresentados os valores individuais para cada saída da THD_i (tabela 5-8), TDD (tabela 5-9) e os valores das componentes harmónicas da corrente nas diferentes fases incluindo o neutro (tabelas 5-10 a 5-13).

Tabela 5-8: Dados da THDi das diferentes saídas do quadro B

Saída	THDi			
B 1.1	87,2	60,8	73,0	327,5
B 1.8	25,3	11,4	50,3	54,3
B 1.11	15,9	34,6	39,0	110,5
B 1.12	56,5	70,6	57,1	268,8
B 1.13	31,6	39,7	38,3	238,3
B 1.14	79,2	18,8	88,3	98,4
B 2.1	32,1	65,0	16,9	40,0
B 2.2	58,3	51,4	37,6	91,7
B 2.6	50,6	16,5	7,8	40,3
B 2.7	72,6	18,0	62,7	168,2
B 2.10	48,9	55,4	66,6	321,7
B 2.12	50,8	37,7	36,3	325,9
B2.13	40,2	58,7	45,6	149,1
B 2.14	38,2	37,2	31,7	121,7
B 2.15	39,9	17,4	22,8	68,8
B 2.16	51,7	44,7	57,1	243,8
B 3.2	36,1	37,0	37,2	20,8
B 3.3	35,9	54,4	50,2	259,9
B 3.4	30,0	38,0	42,3	327,0
B 3.6	14,6	12,1	17,3	46,1
B 3.7	31,9	32,9	63,2	184,3
B 3.10	18,8	29,0	27,7	101,8
B 3.11	32,3	21,1	11,5	46,5
B 3.13	12,9	13,7	13,5	33,8
B 3.16	59,1	51,6	46,2	133,6

Tabela 5-9: Dados da TDD das diferentes saídas do quadro B

Saída	TDD			
B 1.1	19,4	13,5	16,2	80,6
B 1.8	5,6	2,5	11,2	12,0
B 1.11	2,5	7,6	8,5	24,6
B 1.12	12,6	15,8	12,7	60,3
B 1.13	6,9	8,8	8,5	53,1
B 1.14	17,7	4,2	19,7	22,8
B 2.1	7,0	14,3	2,9	8,8
B 2.2	12,9	11,3	8,4	20,4
B 2.6	11,0	3,5	1,6	8,7
B 2.7	15,0	3,7	13,6	37,8
B 2.10	10,8	12,3	14,8	78,2
B 2.12	11,3	8,4	8,1	78,6
B2.13	8,9	13,1	10,2	34,7
B 2.14	8,5	8,3	7,0	27,4
B 2.15	8,8	3,7	5,0	15,2
B 2.16	11,5	10,0	12,7	54,4
B 3.2	7,8	8,0	8,0	4,2
B 3.3	8,0	12,1	11,2	82,7
B 3.4	6,7	8,5	9,4	76,1
B 3.6	3,1	2,6	3,8	10,0
B 3.7	7,1	7,3	14,1	42,2
B 3.10	4,2	6,4	6,1	22,7
B 3.11	6,5	4,2	2,1	9,8
B 3.13	1,5	1,5	1,3	6,0
B 3.16	13,1	11,4	10,3	29,7

Tabela 5-10: Valores das componentes harmónicas da corrente para a fase 1

Saída	h3	h5	h7	h9	h11	h13	h15	h17	h19	h21	h23	h25	h27	h29
B 1.1	65,3	49,9	20,3	18,0	5,1	3,3	3,2	4,6	2,6	1,4	1,1	1,1	0,9	0,5
B 1.8	14,2	12,9	12,8	8,7	3,0	3,2	1,2	1,7	1,2	0,5	1,0	0,5	0,5	0,3
B 1.11	5,9	5,2	5,4	3,6	1,8	2,7	1,0	1,5	1,2	1,1	0,9	1,1	0,8	0,7
B 1.12	39,5	33,9	17,0	10,3	4,7	4,0	3,8	4,0	1,3	2,0	1,0	0,6	1,4	1,0
B 1.13	24,1	16,6	8,0	6,2	1,8	1,4	0,7	1,5	0,9	0,6	0,8	0,4	0,3	0,4
B 1.14	50,6	46,9	32,4	18,7	4,6	5,4	3,4	4,5	0,8	1,9	0,8	1,3	1,0	1,0
B 2.1	16,9	12,4	16,0	14,4	2,9	6,8	2,6	3,2	2,4	2,0	1,6	1,0	1,3	0,4
B 2.2	41,1	33,0	18,9	12,4	4,2	3,6	1,8	2,2	1,3	1,9	3,0	2,1	0,8	1,4
B 2.6	48,3	4,5	3,8	7,4	2,3	2,3	1,6	0,9	1,3	0,7	1,0	1,7	1,8	0,8
B 2.7	27,0	31,7	34,0	23,7	18,8	16,6	13,0	9,6	9,1	5,6	5,0	4,1	3,5	3,4
B 2.10	30,4	26,2	20,8	14,9	3,0	5,3	3,6	3,1	0,8	2,0	1,8	1,1	0,7	1,3
B 2.12	43,0	23,0	8,1	8,3	5,4	2,1	2,6	3,6	1,4	1,1	1,0	1,0	0,5	1,0
B2.13	25,3	21,8	17,6	11,8	2,3	5,4	1,2	1,9	0,9	1,5	0,7	0,4	0,5	0,6
B 2.14	28,8	22,3	5,9	7,3	2,6	0,9	1,5	2,2	1,2	0,4	1,0	0,7	0,3	0,5
B 2.15	25,7	19,9	16,3	13,6	4,2	4,8	1,2	2,1	1,5	1,1	1,6	0,7	0,7	0,5
B 2.16	42,0	22,3	13,6	9,8	6,4	5,5	4,3	3,5	1,6	2,6	1,3	1,6	1,2	1,2
B 3.2	1,4	26,9	15,8	0,4	10,2	4,5	0,4	5,7	4,9	0,3	4,2	4,6	0,4	5,1
B 3.3	28,1	20,1	4,3	5,2	3,5	1,9	1,6	2,9	2,3	0,7	0,7	1,0	0,6	0,7
B 3.4	25,7	12,9	3,7	5,3	3,2	2,0	1,7	1,7	0,9	0,8	0,5	0,3	0,2	0,4
B 3.6	5,5	10,4	5,4	2,8	2,4	1,9	0,6	1,7	1,4	0,3	1,0	1,3	0,2	1,0
B 3.7	23,1	15,7	12,9	6,7	1,2	2,4	1,4	1,7	1,2	0,5	1,0	0,3	0,3	0,4
B 3.10	16,6	7,5	2,2	3,1	1,1	0,9	1,3	0,4	0,6	0,5	0,3	0,3	0,2	0,1
B 3.11	8,8	19,9	12,5	11,2	4,1	6,3	2,1	3,2	2,8	1,9	2,0	2,1	1,5	1,0
B 3.13	4,2	2,9	3,1	1,2	1,8	1,0	0,6	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2
B 3.16	39,0	30,5	24,8	16,2	8,1	3,7	2,2	2,5	1,2	1,9	1,1	0,7	0,7	0,6

Tabela 5-11: Valores das componentes harmónicas da corrente para a fase 2

Saída	h3	h5	h7	h9	h11	h13	h15	h17	h19	h21	h23	h25	h27	h29
B 1.1	43,7	35,9	15,5	14,3	3,1	1,7	2,2	3,3	1,7	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5
B 1.8	11,0	0,9	1,9	1,0	0,6	0,5	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
B 1.11	26,2	13,8	13,4	9,2	1,2	3,6	2,0	2,0	0,9	1,2	1,2	0,4	0,3	0,5
B 1.12	57,7	35,5	16,0	9,2	4,5	3,8	2,6	2,1	0,6	1,4	0,8	0,5	0,4	0,8
B 1.13	33,1	19,3	6,8	6,4	1,5	0,5	0,9	1,5	1,0	0,3	0,4	0,3	0,7	0,3
B 1.14	11,6	8,7	9,0	7,0	1,3	2,1	0,6	0,9	0,8	0,9	0,8	0,2	0,3	0,5
B 2.1	43,6	26,2	29,1	22,1	8,1	5,4	3,2	3,8	3,0	1,6	3,0	2,2	2,7	1,6
B 2.2	35,4	23,2	22,2	11,8	5,6	4,7	3,4	3,7	3,7	1,5	3,0	3,0	2,0	1,8
B 2.6	10,1	9,9	4,7	4,0	1,8	1,5	1,4	0,9	0,6	0,8	0,7	0,9	0,9	0,7
B 2.7	13,8	6,6	3,4	3,0	2,1	2,8	1,4	0,7	0,7	1,1	0,9	1,1	0,6	0,9
B 2.10	35,3	29,2	23,7	17,4	3,6	6,5	2,5	3,2	2,3	2,2	2,0	0,9	0,8	0,8
B 2.12	31,5	18,5	4,9	5,4	4,3	1,4	1,2	1,8	1,1	0,3	0,6	0,2	0,2	0,3
B2.13	34,5	35,4	25,5	16,2	2,2	6,2	3,0	3,5	2,7	1,3	1,0	0,6	0,7	0,7
B 2.14	33,4	14,5	3,4	5,2	2,5	1,0	2,2	1,2	1,3	0,6	0,6	0,5	0,4	0,3
B 2.15	3,7	9,1	10,2	7,9	2,6	1,9	1,2	1,5	0,8	0,6	0,8	0,2	0,2	0,2
B 2.16	35,0	20,0	13,5	10,7	3,3	5,0	2,0	3,5	2,9	0,6	0,9	1,3	0,4	0,6
B 3.2	1,3	27,7	15,8	0,5	10,3	4,2	0,4	6,0	5,0	0,4	4,4	4,7	0,5	5,3
B 3.3	44,4	28,3	5,3	6,3	6,7	3,8	1,6	3,7	3,6	2,1	0,9	1,3	1,4	0,8
B 3.4	33,2	16,3	3,6	4,9	4,3	1,4	2,0	2,2	0,8	0,5	0,4	0,5	0,3	0,7
B 3.6	1,3	9,5	5,3	2,1	2,2	2,1	0,4	1,4	1,1	0,3	1,0	1,2	0,3	0,8
B 3.7	25,9	15,3	10,7	6,2	1,1	2,2	1,5	1,9	1,1	0,6	0,9	0,3	0,2	0,4
B 3.10	12,0	10,7	11,6	11,3	9,8	7,8	6,9	6,3	5,2	4,1	3,3	2,3	1,4	0,8
B 3.11	10,8	8,7	6,3	7,4	3,0	4,6	1,9	3,0	3,1	1,5	1,5	1,2	1,2	1,6
B 3.13	4,6	3,2	2,7	1,4	1,9	0,9	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
B 3.16	37,6	24,4	19,2	12,5	7,3	3,3	1,7	2,5	2,3	1,0	1,6	0,9	0,6	0,7

Tabela 5-12: Valores das componentes harmónicas da corrente para a fase 3

Saída	h3	h5	h7	h9	h11	h13	h15	h17	h19	h21	h23	h25	h27	h29
B 1.1	51,4	44,6	14,7	18,0	8,0	3,5	1,9	5,3	2,7	1,1	1,0	1,6	1,1	0,4
B 1.8	37,1	21,8	18,8	16,0	2,9	4,4	2,6	2,5	1,5	1,6	0,7	0,4	0,7	0,7
B 1.11	21,7	22,2	17,7	11,2	3,2	4,3	1,5	2,1	1,7	1,2	0,9	0,8	0,8	0,5
B 1.12	48,3	25,5	12,2	8,3	3,5	3,2	2,6	2,9	1,2	0,8	0,4	1,1	0,7	0,8
B 1.13	30,4	20,1	7,9	6,7	2,7	0,9	1,2	1,8	2,0	0,6	0,4	0,4	0,6	0,7
B 1.14	64,7	47,1	32,7	15,9	3,0	4,1	3,0	2,7	2,1	0,8	1,7	1,2	0,6	0,5
B 2.1	10,5	5,7	3,1	2,9	1,9	1,6	1,0	0,8	0,7	0,7	0,5	0,4	0,5	0,5
B 2.2	31,3	12,3	11,6	10,0	1,4	4,6	2,5	1,4	0,6	1,8	0,4	0,7	0,8	0,8
B 2.6	5,4	3,1	2,4	1,2	1,2	1,0	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
B 2.7	58,9	3,3	3,4	14,8	1,4	1,9	3,2	0,7	0,9	1,6	0,5	0,5	0,5	0,4
B 2.10	48,9	34,1	22,0	16,3	3,6	7,6	2,9	3,1	1,4	3,1	1,2	1,0	1,7	0,8
B 2.12	30,3	16,6	6,6	7,2	3,9	2,2	1,5	1,8	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2
B2.13	30,6	26,9	16,3	9,9	2,7	5,1	1,2	1,9	1,3	1,5	0,6	0,4	0,5	0,5
B 2.14	21,9	20,9	4,3	5,2	2,2	1,1	0,5	1,0	0,6	0,4	0,6	0,5	0,4	0,3
B 2.15	21,6	4,8	3,7	1,7	1,7	1,1	0,8	0,4	0,7	0,3	0,4	0,2	0,2	0,3
B 2.16	47,4	24,4	12,5	12,5	4,6	5,2	4,2	4,0	1,2	2,4	0,6	0,9	1,3	1,1
B 3.2	1,3	27,9	15,9	0,5	10,2	4,6	0,4	6,1	5,2	0,3	4,1	4,7	0,5	5,5
B 3.3	40,3	27,7	6,9	6,3	3,2	2,6	0,8	1,4	1,0	0,8	0,8	0,4	0,3	0,3
B 3.4	37,4	17,2	3,1	6,9	3,7	1,0	2,9	2,3	0,5	0,9	0,5	0,4	0,3	0,7
B 3.6	1,8	14,5	7,3	0,6	2,2	2,8	0,2	1,8	1,6	0,2	1,2	1,3	0,2	1,0
B 3.7	51,4	32,3	14,3	7,9	2,7	2,9	2,4	2,1	1,5	0,5	1,0	0,3	0,4	0,5
B 3.10	14,3	10,8	9,5	9,0	8,3	6,9	6,9	5,6	4,5	3,7	2,9	2,0	1,5	0,9
B 3.11	8,0	3,4	2,4	1,1	1,3	1,2	0,7	0,6	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
B 3.13	4,1	2,3	2,4	0,9	1,3	1,0	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
B 3.16	33,4	24,5	15,6	10,4	5,4	4,0	1,8	2,3	0,7	1,8	0,4	0,3	0,5	0,7

Tabela 5-13: Valores das componentes harmónicas da corrente para o condutor de neutro

Saída	h3	h5	h7	h9	h11	h13	h15	h17	h19	h21	h23	h25	h27	h29
B 1.1	327,5	12,0	9,1	149,4	10,7	5,8	19,4	3,7	1,9	6,9	1,9	2,7	5,8	1,9
B 1.8	38,3	19,3	17,1	26,9	1,8	4,2	3,7	1,7	2,1	2,3	0,8	1,0	1,4	0,9
B 1.11	96,2	23,0	23,5	40,2	4,6	7,9	6,7	2,2	1,7	4,8	2,0	2,1	1,7	0,9
B 1.12	263,4	30,2	13,8	46,3	6,6	5,2	11,2	2,2	2,1	5,4	1,5	2,0	3,4	2,2
B 1.13	231,5	19,7	11,7	49,9	3,9	2,5	5,6	1,7	2,8	2,2	2,1	1,0	2,3	1,6
B 1.14	90,9	24,7	6,3	37,7	3,2	3,3	5,0	2,9	2,6	3,5	1,5	1,8	1,6	0,5
B 2.1	25,5	11,6	13,0	22,8	4,3	5,1	3,0	3,2	1,8	2,4	2,0	0,6	2,4	0,9
B 2.2	86,3	8,3	9,1	25,6	2,3	8,0	5,5	2,0	2,2	2,7	1,3	0,8	1,6	1,6
B 2.6	35,0	9,7	5,7	11,7	3,0	2,8	3,6	1,4	1,1	2,2	1,2	1,7	1,8	1,0
B 2.7	94,4	68,5	69,7	71,7	45,0	27,4	26,5	20,9	19,9	18,9	14,8	11,6	9,0	6,9
B 2.10	313,6	47,7	11,8	143,1	9,2	8,4	25,1	5,3	3,1	20,8	4,4	2,9	8,4	3,7
B 2.12	325,4	49,0	20,9	117,8	11,7	6,9	28,3	12,2	6,1	7,7	7,9	5,1	3,7	5,5
B2.13	142,3	20,3	4,5	57,9	4,5	2,9	7,4	2,2	1,4	6,9	1,2	1,1	2,0	0,9
B 2.14	112,9	16,5	3,8	44,7	3,7	2,1	5,5	2,1	1,2	5,3	1,2	1,0	1,9	0,7
B 2.15	63,8	3,1	9,9	21,4	3,5	3,3	1,6	1,3	1,0	1,1	1,2	0,5	0,7	0,8
B 2.16	232,4	28,4	13,2	59,1	13,4	9,2	19,7	7,3	5,9	10,7	4,7	4,3	4,7	3,8
B 3.2	15,0	9,6	4,2	2,4	1,5	1,6	1,1	2,0	1,3	0,7	0,7	0,8	1,0	1,7
B 3.3	258,4	168,1	43,5	179,5	47,4	23,2	32,4	27,7	29,1	34,7	15,7	21,2	25,9	13,1
B 3.4	326,9	30,5	9,6	84,3	7,5	4,3	31,1	3,2	1,8	10,5	2,4	1,9	3,9	1,7
B 3.6	31,3	15,9	12,5	23,4	3,2	3,5	3,8	1,5	1,8	2,4	1,1	0,9	1,7	1,3
B 3.7	180,1	27,7	8,8	47,2	3,9	3,5	10,7	2,0	1,2	2,9	1,8	0,7	1,1	1,2
B 3.10	97,9	18,0	7,5	16,2	6,2	2,6	7,7	2,3	2,4	2,3	1,9	1,2	1,7	1,1
B 3.11	23,0	24,4	12,0	22,7	6,0	4,3	4,0	4,7	4,4	3,5	2,6	2,3	2,6	1,9
B 3.13	24,3	6,1	5,6	6,3	2,6	2,5	2,3	1,8	1,7	1,4	1,3	1,2	1,0	1,0
B 3.16	122,7	27,0	8,6	42,4	4,4	2,9	5,8	3,3	1,7	5,5	1,3	1,0	1,5	1,0

Capítulo 6

Discussão

Tendo em conta os resultados apresentados, o ponto da instalação que se encontra mais afetado pelas correntes harmónicas é o PT1. Com a remodelação do novo PT 1 e sabendo que a compensação reativa amplifica as correntes harmónicas da instalação, realizou-se uma pesquisa sobre a evolução tecnológica nesta área.

Com os dados recolhidos é possível afirmar que os níveis de THD_i do PT 1 impossibilitam a utilização de baterias com filtros anti harmónicos.

Este tipo de baterias por exemplo da gama Varset da Schneider, possui o escalonamento apresentado nas tabelas 6-1 e 6-2:

Tabela 6-1: Tabela de seleção da bateria de compensação tendo em conta a THD_i

THD_i	Classic	Comfort	Harmony	Filtros
$\leq 5 \%$	X			
$5 \% < \dots \leq 10 \%$		X		
$10 \% < \dots \leq 20 \%$			X	
$> 20 \%$				X

Tabela 6-2: de seleção da bateria de compensação tendo em conta a THD_u

THD_u	Classic	Comfort	Harmony	Filtros
$\leq 3 \%$	X			
$3 \% < \dots \leq 4 \%$		X		
$4 \% < \dots \leq 7 \%$			X	
$> 7 \%$				X

A inclusão de filtros ativos e caso seja verificado deste modo a possibilidade de retorno do investimento para um prazo máximo de 4 anos, seria uma hipótese.

Uma vez que com este estudo foi possível determinar os equipamentos que mais influenciam os níveis de correntes harmônicas, (não devendo os restantes serem desvalorizados), com o projeto de requalificação do PT1, tendo em conta o aumento de potência deste, possivelmente com a introdução de mais do que dois transformadores e sabendo que existe uma necessidade de inclusão de novas baterias de condensadores seria interessante ter em conta a possibilidade de equilibrar as cargas mais poluentes pelos transformadores instalados.

Esta situação permitiria diminuir os níveis de THD atualmente suportados por um só transformador, deste modo em vez da aquisição de baterias de condensadores comuns poderá ter-se em perspetiva a aquisição das baterias de gama Varsset que permitiram:

- Eliminar a corrente harmónica em sistemas com carga não linear.
- Prevenir a destruição dos condensadores por ressonância da corrente harmónica
- Diminuir significativamente a distorção da forma de onda da tensão
- Diminuir a queda de tensão em transformadores e cabos
- Reduzir a variação de temperatura em transformadores e cabos
- Aumentar o fator de potência, podendo chegar ao valor unitário
- Aumentar a vida útil das cargas energética com redução das perdas por aquecimento
- Reduzir os custos de manutenção equipamento e hora/homem

Esta ação é possível visto que as cargas alimentadas pelo PT1 tem um comportamento periódico, não existem grandes variações ao nível de carga, facilmente se identificaria a potência total necessária para alimentar todas as cargas.

Com a introdução de equipamento de teste (câmaras climáticas), que irá aumentar o consumo do PT1 e sabendo que estes são equipamentos que possuem eletrónica de potência para controlar o processo de teste, os níveis de correntes harmónicas neste PT irão aumentar.

Os transformadores que serão instalados serão reaproveitados de outros PTs por forma a não elevar o custo deste investimento. Como tal, são equipamentos que apresentam algum desgaste, associado a aquecimentos provocados pelas correntes harmónicas e dos efeitos de ressonância.

Focando agora as cargas mais poluentes associadas ao PT1 com este estudo foi possível determinar que a THD_i é influenciada pela bateria de condensadores. Esta além de aumentar os níveis de distorção harmónica tal como mostra o gráfico 6-1, aumenta os níveis da tensão e diminui os níveis da corrente. Esta situação deve-se ao facto das cargas não receberem a compensação reativa por parte da bateria de condensadores e como tal é requisitado ao transformador mais corrente para o funcionamento das mesmas.

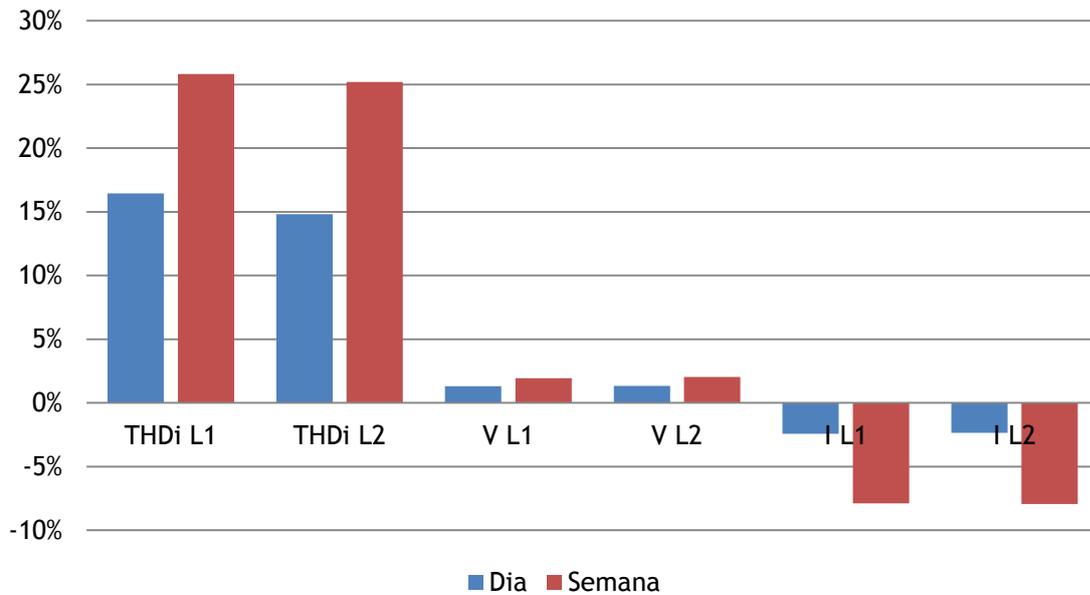


Gráfico 6-1: Relação da diferença de valores entre a altura da manutenção com a média diária e a média semanal

Os gráficos 6-2 a 6-4 apresentam os valores da corrente e das distorções harmônicas apresentados durante as semanas 6 a 8 de 2014 pelo compressor 3 e pelo *Chiller 2*, para que se possa ter uma ideia geral da influência destes junto do PT1.

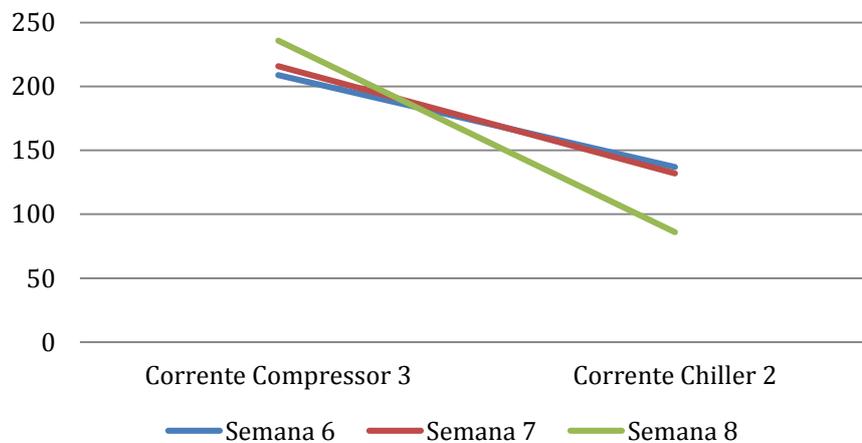


Gráfico 6-2: Valores médios das correntes no Compressor 3 e no *Chiller 2* nas semanas 6, 7 e 8.

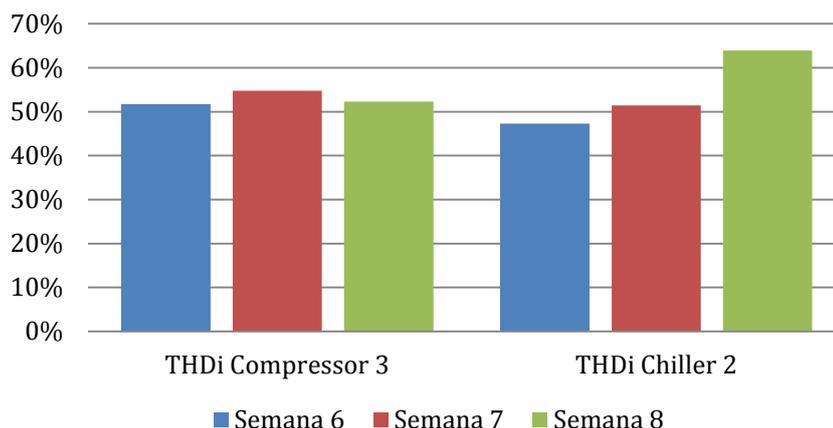


Gráfico 6-3: Valores médios da THDi no Compressor 3 e no Chiller 2 nas semanas 6,7 e 8.

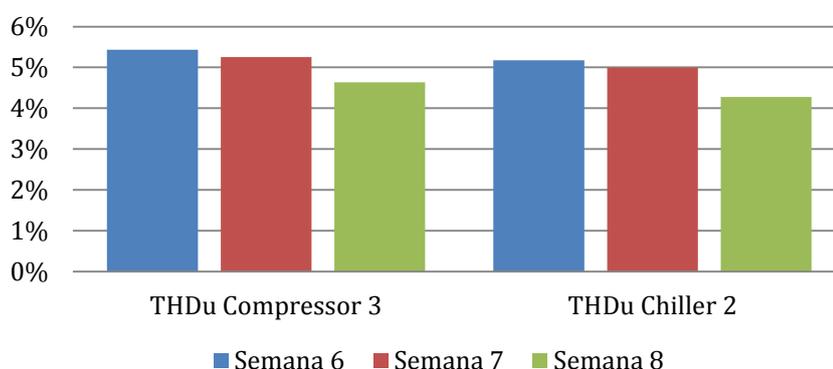


Gráfico 6-4: Valores médios da THDu no Compressor 3 e no Chiller 2 nas semanas 6,7 e 8.

Tendo conhecimento dos valores das distorções de cada um dos equipamentos, torna-se necessário compreender qual a influência destes no consumo geral do PT1. Através do gráfico 6-5 torna-se possível verificar que durante o ano de 2014 o consumo médio mensal destes dois equipamentos chega aos 40 %. Para uma determinação mais pormenorizada através da consulta da tabela 6-3 pode-se verificar que em determinados meses do ano mais de 60 % do consumo do PT1 é feito por estes equipamentos.

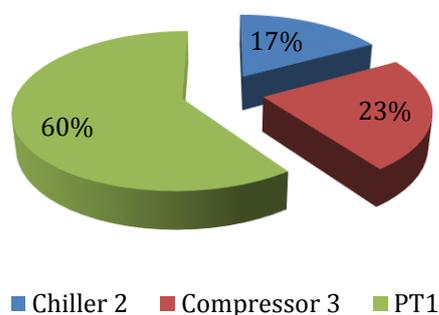


Gráfico 6-5: Média do consumo anual de corrente do PT1 e a sua relação com o consumo do compressor 3 e do Chiller 2

Tabela 6-3: Valores percentuais do consumo de corrente das cargas associado ao PT1

Mês	Chiller 2	Compressor 3	Outras cargas
Janeiro	26%	38%	35%
Fevereiro	22%	39%	39%
Março	15%	24%	61%
Abril	19%	20%	60%
Maio	20%	20%	60%
Junho	16%	14%	69%
Julho	9%	12%	79%
Agosto	8%	17%	75%

Por outro lado, e tendo identificado níveis de correntes harmónicas nas linhas produtivas, a sua compensação torna-se mais difícil. Em primeiro lugar, devido à rotatividade, desmantelamento, reposicionamento de linhas. Os pisos de produção devido às constantes alterações de produtos (introdução de novos, processos de melhoria continua, remoção de linhas produtivas, etc) fazem com que o *layout* destes pisos seja atualizado constantemente.

Tendo em conta que a sua compensação eficiente será mais difícil, e visto que foi detetado nas recolhas de dados realizadas correntes de neutro elevadas, dever-se-ia proceder à retificação das mesmas,

Em algumas linhas o nível de exigência é maior uma vez que o consumo da linha varia com o produto produzido. Torna-se complicado gerir entre máquinas trifásicas e monofásicas, sendo que entre as monofásicas as correntes nominais variam de máquina para máquina. No entanto, nas outras linhas é possível através de uma gestão dos consumos atuais melhorar o equilíbrio entre fases.

Após a análise efetuada relacionada com os níveis de THD presentes nos quadros A, B, C e D, procedeu-se ao planeamento das medições de todas as saídas do quadro B.

Esta decisão prendeu-se com o facto, de os valores de THD medidos serem superiores e de forma quase similar nos quadros A e B, contudo, verificou-se que o consumo do quadro B é superior ao do quadro A.

Após a análise dos dados verificou-se a existência de várias linhas com níveis elevados de corrente no condutor de neutro. Esta situação não é conveniente uma vez que os cabos, dependendo do dimensionamento que foi feito, por vezes possuem uma secção mais reduzida quando comparada com a secção da fase. Verificou-se também que em algumas situações a corrente que atravessava o condutor de neutro é superior à corrente de fase.

Esta situação acontece por não se tratar de um sistema trifásico equilibrado. Num sistema equilibrado as amplitudes complexas das correntes em valor eficaz que circulam nas cargas pode ser representado pelo diagrama vectorial apresentado na figura 6-1.

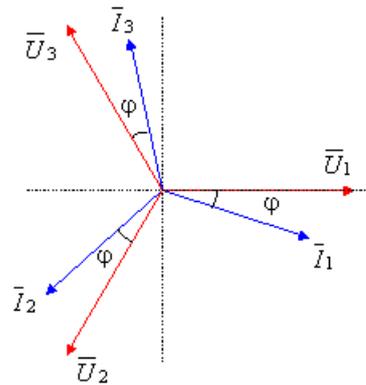


Figura 6-1: Diagrama vetorial das correntes e das tensões nas fases de uma carga equilibrada ligada em estrela

Este conjunto de 3 correntes, tem a mesma amplitude e estão desfasadas entre si de $\frac{2\pi}{3}$, pelo que constituem um sistema trifásico equilibrado de correntes. Deste modo a corrente de neutro será nula, aplicando a lei de Kirchoff dos nós obtém-se a equação 6-1:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_N = 0$$

Equação (6-1)

Uma possível solução para este problema será a troca entre duas fases, o que poderá permitir que os ângulos das três fases se distancie diminuindo por sua vez a corrente de neutro resultante.

Com as alterações das linhas, estão a ser implementados novos quadros independentes, para permitir uma monitorização permanente da linha estão a ser implementados analisadores de rede. Com esta implementação vai ser possível criar um histórico do modo de operação da linha, e ter um controlo maior sobre a qualidade de energia da instalação elétrica.

Para que situações como esta possam acontecer no futuro, o primeiro grande aspeto que será pertinente implementar será uma interligação de processos, nomeadamente ao nível das mudanças de linha/alteração do *layout* produtivo. Que consiste na organização de um histórico com as características de cada máquina produtiva, tendo acesso à informação de que máquinas são necessárias para a produção de cada produto, que ajudará no futuro a distribuir as cargas de forma equilibrada.

Do ponto de vista da compensação dos transformadores 1 e 2 do PT2, os níveis de distorção harmónica, também eles são elevados e sabendo que poderão aumentar com a inclusão de novas cargas associadas uma vez que estes ainda se encontram afastados do seu limite de funcionamento.

Capítulo 7

Conclusão e perspetivas futuras

Com este estudo foram identificadas as áreas mais afetadas pelas correntes harmónicas. Ao nível dos PTs o que se encontra mais afetado é o PT1 que alimenta os serviços de apoio à produção. Como é o PT mais afetado foram ainda identificadas as cargas que mais influenciam os níveis da THD, nomeadamente o *Chiller 2* e o Compressor 3 tendo sido provado que estas representam cerca de 40 % do consumo global deste PT.

Atualmente, e tendo em conta que apenas um dos transformadores do PT1 se encontra em funcionamento, a diminuição das correntes harmónicas não é possível por parte da gama de baterias Varset da Schneider devido ao facto dos valores da THD_i serem tão elevados. O mesmo sucede nos transformadores 1 e 2 do PT2. Este estudo proporcionou ainda a determinação do fator K de cada transformador. Este fator permite avaliar qual a potência máxima que cada transformador pode fornecer à instalação, tendo sido detetado um decréscimo significativo da potência em todos os transformadores. Os transformadores 1 e 2 do PT 2 são os que se encontram mais debilitados tendo em conta o fator K.

Como trabalho futuro e tendo sido identificadas as cargas do PT1 que mais influenciam os valores da THD_i seria interessante a realização de um estudo económico que avaliasse os custos associados à diminuição das correntes harmónicas promovidas por estes equipamentos, bem como quantificar qual a percentagem da diminuição do ponto de vista do PT1 dos valores da THD com a retificação dessas duas cargas.

Dado que se incluiu a prática de colocação da data quando se substitui condensadores nas baterias, deverá ser criado um histórico que apresente o período de utilização dos condensadores bem como os custos associados a esta manutenção, nomeadamente os custos com a energia reativa faturada, mão-de-obra, e custos de novos equipamentos (condensadores, contactores e resistências de pré-carga). Estes valores uma vez que se encontram associados às distorções harmónicas deverão ser apresentados no estudo referido no parágrafo anterior.

Na área produtiva os quadros A e B associados aos transformadores 1 e 2 do PT 2 são os mais afetados pelas correntes harmônicas. Com as medições realizadas junto do Quadro B, além de se verificar quais as saídas que mais influenciam estas correntes, foi possível constatar que a instalação elétrica possui um problema com correntes (elevadas) no condutor de neutro.

Para este problema existe um conjunto de possíveis soluções:

- (i) Aumentar a secção de neutro (para que este possa suportar com as correntes elevadas e por sua vez diminuir a queda de tensão pela diminuição da resistência do condutor);
- (ii) Utilizar um neutro independente para cada fase (torna a corrente de cada condutor independente menor);
- (iii) Melhorar o equilíbrio entre fases.

Tal como foi apresentado no capítulo anterior outra possibilidade encontra-se relacionada com a troca entre duas fases, uma vez que a corrente de neutro é a soma vetorial das correntes nas 3 fases, que é sempre menor do que a corrente de cada uma das fases (daí a utilização de secções reduzidas para o condutor de neutro). Esta situação torna-se mais complexa quando a mesma saída alimenta por exemplo três equipamentos monofásicos independentes ligados em fases diferentes, uma vez que nesta situação poderá existir um problema que depende da impedância de cada equipamento.

Tendo em conta a alteração da linha 2N03 e visto que esta apresenta elevados valores de correntes de neutro, seria interessante realizar uma distribuição de cargas diferente por forma a diminuir este valor. Para tal, seria necessário fazer a recolha das características de funcionamento de todos os equipamentos e otimizar a sua distribuição. Quando esta linha entrasse em funcionamento verificar-se-ia se a alteração teria valorizado a qualidade de energia dessa mesma linha e se o equilíbrio foi encontrado.

Caso o desequilíbrio se mantenha, tal como foi apresentado na discussão de resultados, a troca entre duas fases pode solucionar o problema, na medida em que o ângulo existente entre as correntes possa ser alterado permitindo um valor da corrente de neutro mais reduzido.

É de ressaltar que esta linha não foi a que apresentou valores mais críticos, contudo, e uma vez que se encontra programada a sua instalação num outro setor, poderá ser o ponto de partida para retirar conclusões sobre o equilíbrio entre as fases e a sua viabilidade. Além deste fator, e tendo em conta que não será alimentada por nenhum dos quadros mencionados, poderá fornecer uma informação quanto aos níveis de correntes harmônicas e a sua influência. Dependendo do lugar onde se instale, poderá determinar-se os níveis de correntes harmônicas antes e depois da sua instalação. Além desta comparação poderá verificar-se se os níveis de correntes harmônicas na linha aumentam ou diminuem.

De acordo com os valores obtidos nas saídas do Quadro B seria pertinente verificar os valores das correntes de neutro nos restantes quadros de distribuição (A, C e D), para que situações como esta possam ser corrigidas.

Referências

- [1] Orlando, Paraíba;, “Apresentação ENA - Seminário de Formação Avançada ISO 5001,” Outubro 2012.
- [2] Lehni, M., A Eco-eficiência, North Yorkshire, UK: WBCSD, 2001.
- [3] <http://yearbook.enerdata.net/energy-consumption-data.html#electricity-domestic-consumption-data-by-region.html>).
- [4] <http://yearbook.enerdata.net/energy-consumption-data.html#electricity-domestic-consumption-data-by-region.html>).
- [5] (<http://yearbook.enerdata.net/energy-consumption-data.html#electricity-domestic-consumption-data-by-region.html>)
- [6] Relatório do Estado do Ambiente REA 2013 Portugal
- [7] <http://www.pordata.pt/Portugal/Ambiente+de+Consulta/Tabela>
- [8] <http://www.i-micronews.com/reports/Status-MEMS-Industry-2014/1/454/>
- [9] NP EN 50160
- [10] Martinho, Edson, “Distúrbios da energia elétrica”, Editora Érica, São Paulo, 2012, ISBN 978-85-365-0231-1.
- [11] DAS, J. C. (2002). *Power System Analysis: Short-Circuit Load Flow and Harmonics*, Marcel Dekker.
- [12] Sankaran, C. (2002). *Power Quality*, CRC Press
- [13] Arrillaga, J., Watson, N. R. e Chen, S. (2000). *Power System Quality Assessment*. John Wiley & Sons
- [14] Wakileh, G. J. (2001). *Power Systems Harmonics: Fundamentals, Analysis and Filter Design*. Springer, Berlin, Germany
- [15] Chan, W. L., SO, A. T. P. e LAI, L. L. (2000) *Wavelet Feature Vectors for Neural Network Based Harmonics Load Recognition. Proc. Of the 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM)*, pp. 511-516.
- [16] Nascimento, C. F., Junior, A. A. O., Goedel, A., Silva, I. N., Monteiro, J. R. B. A e Aguiar, M. L. (2007). *Harmonic Detection Based on Artificial Neural Networks for Current Distortion Compensation. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 2864-2869.
- [17] Lin, H. C. (2007), *Intelligent Neural Network- Based Fast Power System Harmonic Detection. IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 1, pp. 43-52.
- [18] Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S. e Beaty, H. W. (2004) *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill.

- [19]Moreno, H., “Harmônicas nas instalações elétricas”, Instituto Brasileiro do Cobre, São Paulo, 2001.
- [20]Revista neutro à terra nº 13, 1º semestre de 2014 ano 7 ISSN:1647-5496 página 25-34.
- [21]Vanyalgnatova, Pierre Granjon, SeddikBacha *Power Electronics Harmonic Analysis Based on the Linear Time Periodic Modeling Applications for AC/DC Power Electronic Interface*. LEG: Laboratory of Electrical Engineering of Grenoble, France **LIS: Laboratory of Images and Signals, France
- [22]PCIM EUROPE 2014, 20-22 Maio de 2014, Nuremberga
- [23]Schneider Electric, “Harmonicsmitigationandsolutions”
http://www.schneiderelectric.cn/medias/solutions/downloads/377ed18_harmonics_mitigation_solutions.pdf,consultado a 14 de Julho de 2014.
- [24]AgusPurwadi, Nana Heryana, DadanNurafiat, AnangMawardi, Pranyoto, Muhammad Firmansyah. *A Study of Harmonic Impacts on High Voltage, Medium Voltage and Low Voltage Networks* in PT. PLN DistributionSystem,
- [25]João Abel Peças Lopes, Instalações elétricas industriais, Perturbações na tensão e seus impactos na exploração de redes elétricas industriais
- [26]IEEE Std. 519-1992
- [27]IEC 61000-2-2
- [28]IEC 61000-3-4
- [29]IEEE Std 519 working group website, <http://grouper.ieee.org/groups/519> Hoevenaars, T., Mirus Int. Inc., Mississauga, Ont., Canada ;LeDoux, K.;Colosino, M (2003)
- [30]Interpreting IEEE Std 519 and Meeting its Harmonic Limits in VFD Applications
- [31]http://ewh.ieee.org/r3/atlanta/ias/IEEE_519.pdf
- [32]<http://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/harmon.pdf>
- [33]FLUKE Compreendendo Harmônicos de Energia -
<http://www.vortex.com.br/notas/harmonicas.pdf>