

QUALIDADE DE ENERGIA ELÉCTRICA NA INDÚSTRIA

João Luiz Afonso
e-mail: jla@dei.uminho.pt

Júlio S. Martins
e-mail: jmartins@dei.uminho.pt

Departamento de Electrónica Industrial
Universidade do Minho
Campus de Azurém
4800-058 Guimarães
Portugal
Tel.: +351 253 604701
Fax: +351 253 510189

RESUMO

No cenário de competição industrial global cada vez mais exigente em que vivemos, deve-se assegurar que são utilizados todos os meios para garantir que os recursos investidos sejam rentabilizados da melhor forma possível, optimizando-se a produção a nível da quantidade, e principalmente da qualidade, e evitando-se perdas desnecessárias.

Os prejuízos económicos resultantes dos problemas de qualidade de energia eléctrica nas indústrias são muito elevados, e por isso essa questão é hoje, mais do que nunca, objecto de grande preocupação.

Estudos realizados na Europa comprovam que a maioria das empresas não têm as suas instalações eléctricas preparadas para lidar com os problemas de qualidade de energia eléctrica, tendo em conta a realidade dos equipamentos utilizados nos processos produtivos. Além disso, verificou-se que, na maior parte dos casos os responsáveis pelas instalações eléctricas nas empresas não associam os problemas que ocorrem ao facto das instalações não estarem adequadas aos problemas de qualidade de energia a que estão sujeitos.

Uma empresa que não esteja preparada para lidar com este tipo de problemas, para além de pagar mais energia eléctrica do que aquela que efectivamente necessita (devido ao acréscimo de perdas nas instalações), pode ter ainda que suportar custos acrescidos substanciais devidos à interrupção ou deterioração de processos produtivos, ou à avaria dos equipamentos utilizados, o que a pode ter como resultado produtos ou serviços de qualidade inferior e com custos superiores aos das empresas concorrentes.

O número de conversores electrónicos de potência utilizados, sobretudo na indústria, mas também pelos consumidores em geral, não pára de aumentar. Em resultado disso é possível observar uma crescente deterioração das formas de onda de corrente e tensão dos sistemas de potência.

Um estudo realizado na Europa em 1998 mostrou que vários problemas de qualidade de energia, tais como, o elevado conteúdo harmónico nas correntes e tensões das instalações eléctricas, sistemas de terra mal ligados, ou o sobreaquecimento dos condutores de fase e neutro, não eram considerados assuntos importantes, não sendo assim associados aos problemas ocorridos nas instalações, não sendo por esse facto quantificados em termos de custos adicionais para as empresas.

Convém realçar que o facto das instalações eléctricas não estarem em condições de fazer face aos problemas de qualidade de energia não se deve necessariamente a erros no projecto inicial, mas sim devido a alterações nos tipos de equipamentos utilizados pelas empresas nos últimos anos, que por um lado se tornaram mais sensíveis a perturbações (por incluírem sistemas de controlo baseados em microelectrónica), e que por outro lado passaram, muitos deles, a contribuir para os problemas de qualidade de energia, por funcionarem como cargas não lineares.

Neste texto será abordado o tema da análise e solução dos problemas relacionados com a qualidade da energia eléctrica, na sua vertente mais clássica – perturbações causadas por sobretensões e subtensões, interrupções de serviço, etc. – e, principalmente, no que diz respeito aos problemas causados pelos harmónicos, decorrentes da utilização de cargas não-lineares.

INTRODUÇÃO

A Engenharia Electrotécnica é uma área tecnológica recente. O próprio estudo da electricidade e magnetismo começou há menos de dois séculos, uma vez que só no ano de 1800 Volta desenvolveu uma pilha eléctrica, dando origem ao estudo da electrodinâmica. Apenas em 1831, Faraday descobriu como produzir electricidade a partir do magnetismo. O primeiro sistema completo de produção, transporte e distribuição de energia eléctrica em corrente alternada data de 1893.

A qualidade da energia eléctrica entregue pelas empresas distribuidoras aos consumidores industriais sempre foi objecto de interesse. Porém, até há algum tempo atrás, a qualidade tinha a ver, sobretudo, com a continuidade dos serviços, ou seja, a principal preocupação era que não houvesse interrupções de energia, e a que as tensões e frequência fossem mantidas dentro de determinados limites considerados aceitáveis.

Durante dezenas de anos a grande maioria dos receptores ligados às redes de energia eléctrica consistiam em cargas lineares. Por essa razão, e uma vez que as tensões da alimentação são sinusoidais, as corrente consumidas eram também sinusoidais e da mesma frequência, podendo apenas encontrar-se desfasadas relativamente à tensão (Figura 1).

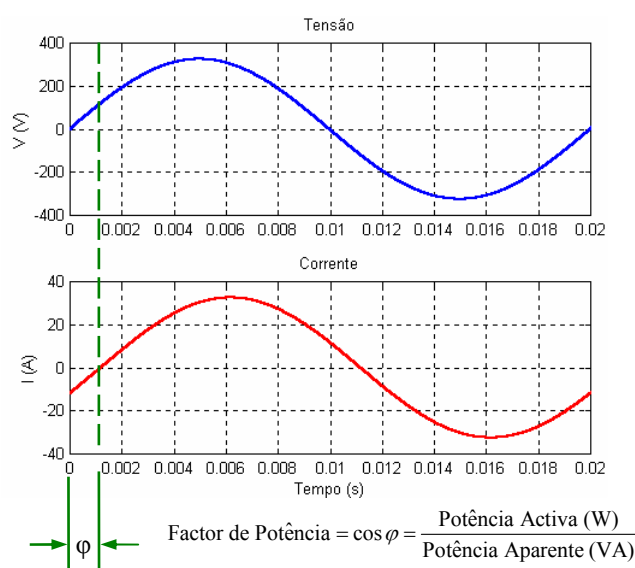


Figura 1 – Tensão e corrente para um sistema eléctrico com cargas lineares.

Com o desenvolvimento da electrónica de potência os equipamentos ligados aos sistemas eléctricos evoluíram, melhorando em rendimento, controlabilidade e custo, permitindo ainda a execução de tarefas não possíveis anteriormente. Contudo, esses equipamentos têm a desvantagem de não funcionarem como cargas lineares, consumindo correntes não sinusoidais, e dessa forma “poluindo” a rede eléctrica com harmónicos. Na Figura 2 apresenta-se as formas de onda de corrente e tensão numa das fases de uma carga trifásica não-linear típica. Como se pode observar a corrente está longe de ser sinusoidal, e como consequência, a tensão de alimentação fica distorcida, tornando-se “achatada” na região próxima ao seu valor máximo.

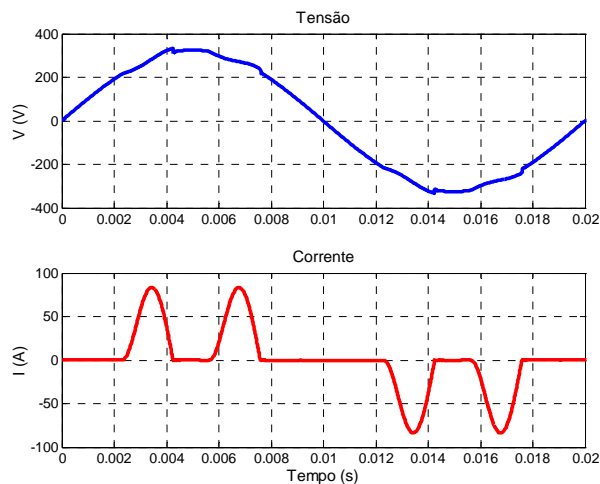


Figura 2 – Tensão e corrente para o caso de uma carga não linear.

A presença de harmónicos nos sistemas de potência resulta num aumento das perdas relacionadas com o transporte e distribuição de energia eléctrica, em problemas de interferências com sistemas de comunicação e na degradação do funcionamento da maior parte dos equipamentos ligados à rede, sobretudo daqueles (cada vez em maior número) que são mais sensíveis por incluírem sistemas de controlo microelectrónicos que operam com níveis de energia muito baixos.

Os prejuízos económicos resultantes destes e de outros problemas dos sistemas eléctricos são muito elevados, e por isso a questão da qualidade da energia eléctrica entregue aos consumidores finais é hoje, mais do que nunca, objecto de grande preocupação. Segundo um relatório do EPRI (*Electric Power Research Institute*) os problemas relacionados com a qualidade da energia e quebras no fornecimento de energia custam à economia dos Estados Unidos mais de 120 mil milhões de euros por ano [1].

Normas internacionais relativas ao consumo de energia eléctrica, tais como IEEE 519, IEC 61000 e EN 50160, limitam o nível de distorção harmónica nas tensões com os quais os sistemas eléctricos podem operar, e impõem que os novos equipamentos não introduzam na rede harmónicos de corrente de amplitude superior a determinados valores. É dessa forma evidenciada a importância em resolver os problemas dos harmónicos, quer para os novos equipamentos a serem produzidos, quer para os equipamentos já instalados.

PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉCTRICA

Entre os problemas de qualidade de energia, a interrupção do fornecimento é, incontestavelmente, o mais grave, uma vez que afecta todos os equipamentos ligados à rede eléctrica, à excepção daqueles que sejam alimentados por UPS's (*Uninterruptable Power*

Supplies – sistemas de alimentação ininterrupta) ou por geradores de emergência. Contudo, outros problemas de qualidade de energia, como os descritos a seguir e ilustrados na Figura 3, além de levarem à operação incorrecta de alguns equipamentos, podem também danificá-los:

- Distorção harmónica: quando existem cargas não lineares ligadas à rede eléctrica a corrente que circula nas linhas contém harmónicos e as quedas de tensão provocadas pelos harmónicos nas impedâncias das linhas faz com que as tensões de alimentação fiquem também distorcidas.
- Ruído (interferência electromagnética): corresponde ao ruído electromagnético de alta-frequência, que pode ser produzido pelas comutações rápidas dos conversores electrónicos de potência.
- Inter-harmónicos: surgem quando há componentes de corrente que não estão relacionadas com a componente fundamental (50 Hz); essas componentes de corrente podem ser produzidas por fornos a arco ou por cicloconversores (equipamentos que, alimentados a 50 Hz, permitem sintetizar tensões e correntes de saída com uma frequência inferior).
- Interrupção momentânea: ocorre, por exemplo, quando o sistema eléctrico dispõe de disjuntores com religador, que abrem na ocorrência de um curto-circuito, fechando-se automaticamente após alguns milissegundos (e mantendo-se ligados caso o curto-circuito já se tenha extinguido).
- Subtensão momentânea (*voltage sag*): também conhecido por “cava de tensão”, pode ser provocada, por exemplo, por um curto-circuito momentâneo num outro alimentador do mesmo sistema eléctrico, que é eliminado após alguns milissegundos pela abertura do disjuntor do ramal em curto.
- Sobretensão momentânea (*voltage swell*): pode ser provocada, entre outros casos, por situações de defeito ou operações de comutação de equipamentos ligados à rede eléctrica.
- Flutuação da tensão (*flicker*): acontece devido a variações intermitentes de certas cargas, causando flutuações nas tensões de alimentação (que se traduz, por exemplo, em oscilações na intensidade da iluminação eléctrica).
- Micro-cortes de tensão (*notches*): resultam de curto-circuitos momentâneos, que ocorrem durante intervalos de comutação dos semicondutores de potência dos rectificadores.
- Transitórios: ocorrem como resultado de fenómenos transitórios, tais como a comutação de bancos de condensadores ou descargas atmosféricas.

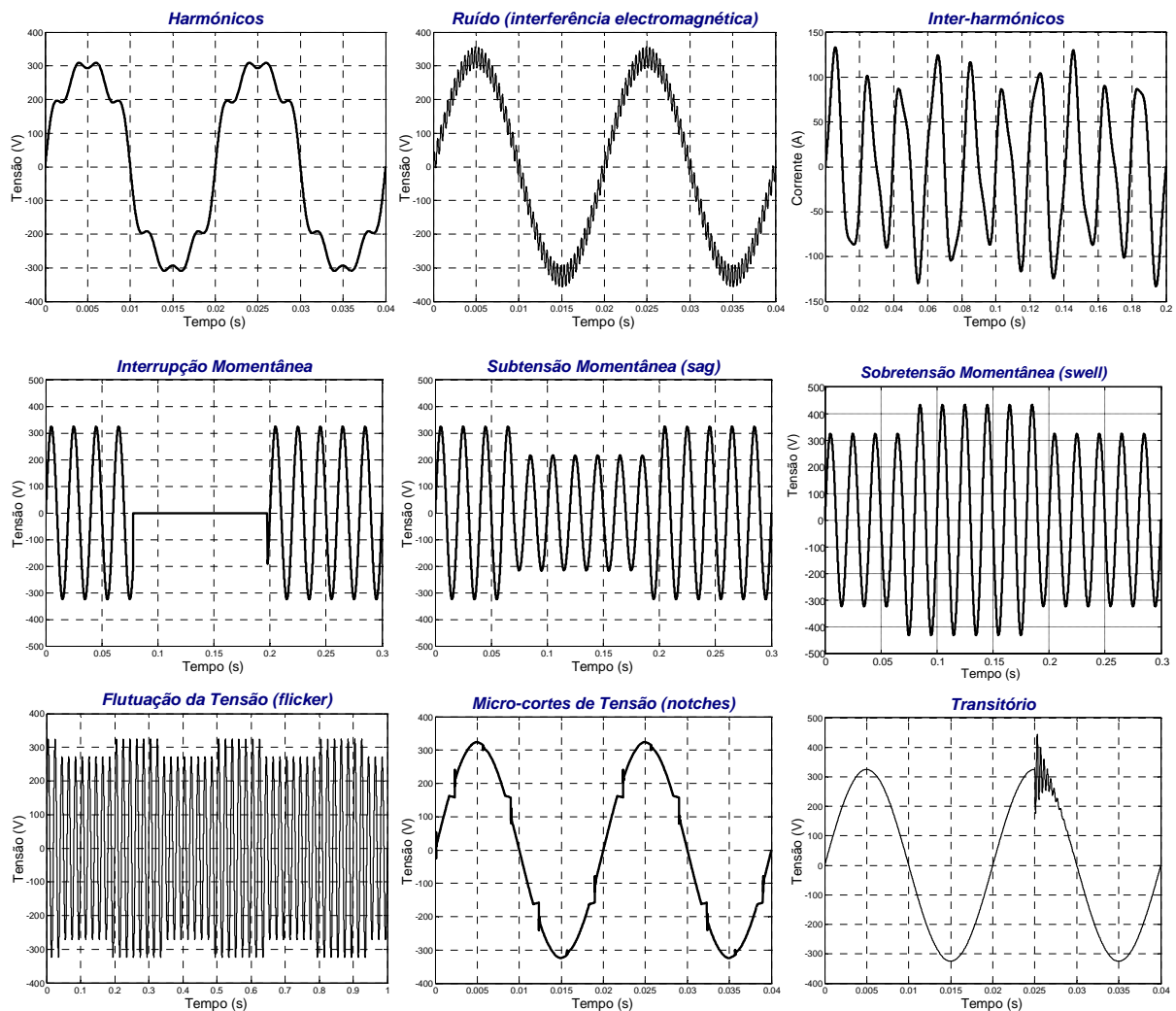


Figura 3 - Problemas de qualidade de energia eléctrica.

ORIGENS DA “POLUIÇÃO” HARMÓNICA

Grande parte dos problemas que surgem nos sistemas eléctricos tem origem na excessiva distorção das correntes ou tensões junto ao consumidor final.

A principal causa deste fenómeno, que pode ser visto como um tipo de poluição do ambiente electromagnético, é a crescente popularidade dos equipamentos electrónicos alimentados pela rede eléctrica, tais como computadores, aparelhos de televisão, balastos electrónicos para lâmpadas de descarga, controladores electrónicos para uma enorme variedade de cargas industriais, etc.

Quase todos os equipamentos electrónicos com alimentação monofásica ou trifásica incorporam um circuito rectificador à sua entrada, seguido de um conversor comutado do tipo *cc-cc* ou *cc-ca*. Um dos tipos de rectificadores mais utilizados em equipamentos de baixa potência é o rectificador monofásico de onda completa com filtro capacitivo, que possui uma corrente de entrada altamente distorcida, tal como se mostra na Figura 4. O elevado conteúdo harmónico da corrente distorce a tensão de alimentação devido à queda de tensão na impedância das linhas.

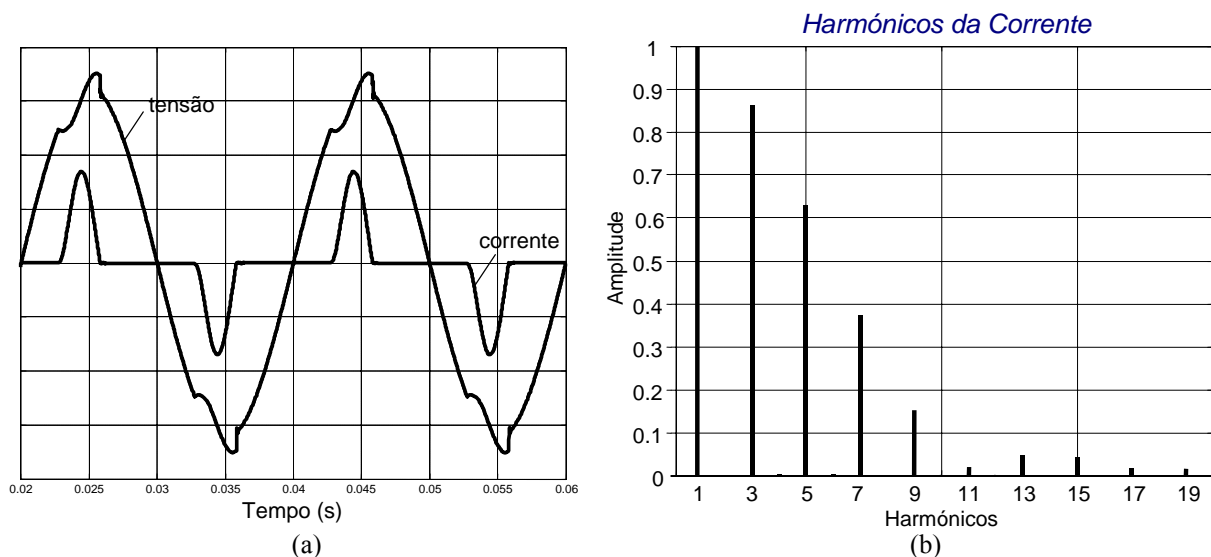


Figura 4 – Rectificador monofásico com filtro capacitivo: (a) formas de onda da tensão e da corrente de entrada; (b) harmónicos da corrente (valores normalizados).

Os controladores de fase, muito utilizados para controlar a potência em sistemas de aquecimento e ajustar a intensidade luminosa de lâmpadas (*dimmers*), também produzem formas de onda com conteúdo harmónico substancial e interferência electromagnética de alta-frequência. Mesmo as lâmpadas fluorescentes normais contribuem significativamente para os harmónicos na rede, devido ao comportamento não linear das descargas em meio gasoso e ao circuito magnético do balastro, que pode operar na região de saturação.

EFEITOS DA “POLUIÇÃO” HARMÓNICA

Para além da distorção das formas de onda, a presença de harmónicos nas linhas de distribuição de energia origina problemas nos equipamentos e componentes do sistema eléctrico, nomeadamente [2-8]:

- aumento das perdas (aquecimento), saturação, ressonâncias, vibrações nos enrolamentos e redução da vida útil de transformadores;
- aquecimento, binários pulsantes, ruído audível e redução da vida útil das máquinas eléctricas rotativas;
- disparo indevido dos semicondutores de potência em rectificadores controlados e reguladores de tensão;
- problemas na operação de relés de protecção, disjuntores e fusíveis;
- aumento nas perdas dos condutores eléctricos;
- aumento considerável na dissipação térmica dos condensadores, levando à deterioração do dieléctrico;
- redução da vida útil das lâmpadas e flutuação da intensidade luminosa (*flicker* – para o caso de ocorrência de subharmónicos);
- erros nos medidores de energia eléctrica e instrumentos de medida;
- interferência electromagnética em equipamentos de comunicação;
- mau funcionamento ou falhas de operação em equipamentos electrónicos ligados à rede eléctrica, tais como computadores, controladores lógicos programáveis (PLCs), sistemas

de controlo comandados por microcontroladores, etc. (cabe lembrar que estes equipamentos controlam frequentemente processos de fabrico).

CASOS REAIS DE PROBLEMAS PROVOCADOS POR HARMÓNICOS

Em Janeiro de 1992 um novo sistema de computação foi instalado num prédio pertencente à empresa de seguros Groupama, em Paris. Uma vez ligada a alimentação o disjuntor principal disparou, cortando todo o sistema. Depois de muito tempo despendido em verificações, os engenheiros descobriram que a interrupção tinha sido causada pelo valor excessivo da corrente no neutro do sistema trifásico. Apesar do sistema estar equilibrado a corrente no neutro tinha um valor igual a 65% do valor das correntes na fase, o que levava ao desarme do disjuntor, já que o relé da corrente no neutro estava ajustado para 50% do valor das correntes na fase. Cabe aqui ressaltar que, num sistema trifásico equilibrado a corrente de neutro deve ser igual a zero. Contudo quando a corrente está distorcida, contrariamente ao que normalmente ocorre, os harmónicos de corrente múltiplos de 3 somam-se no neutro, em vez de se cancelarem.

Estudos demonstram que as correntes no neutro têm aumentando nos edificios comerciais. Isso se deve-se a utilização crescente de equipamentos electrónicos, tais como, computadores, impressoras, fotocopiadoras, aparelhos de fax, etc. Esses equipamentos utilizam rectificadores monofásicos à entrada, que produzem harmónicos de corrente múltiplos do de 3º ordem, tais como o 3º, o 9º e o 15º harmónicos.

Uma companhia de distribuição de energia eléctrica dos Estados Unidos reportou a avaria de um transformador cuja carga não excedia o seu valor nominal de potência aparente, mas cujos receptores consistiam sobretudo em sistemas de accionamento electrónico de velocidade variável para motores eléctricos, com consumo de correntes com elevado conteúdo harmónico.

Noutro caso documentado, um transformador de 300 kVA avariou-se, embora as correntes medidas no transformador não apresentassem valores superiores aos nominais. O transformador foi substituído por outro idêntico, e este apresentou os mesmos problemas pouco tempo depois. A medição das correntes com um amperímetro *true rms* (capaz de medir o verdadeiro valor eficaz, tendo em consideração os harmónicos existentes na corrente) mostrou que os transformadores operavam em sobrecarga devido aos harmónicos de corrente [9].

NORMALIZAÇÃO

Estima-se que em países industrializados cerca de 50 a 60% de toda a potência eléctrica flui através de um qualquer equipamento de electrónica de potência, originando por isso eventuais problemas de qualidade de energia eléctrica. E esta percentagem tem vindo sempre a aumentar. Na Suíça, por exemplo, o conteúdo harmónico nos sistemas de distribuição em baixa-tensão subiu de 3,6% no ano de 1971 para 4,7% em 1991.

Para combater o aumento da “poluição” electromagnética, organizações como a CEI – Comissão Electrotécnica Internacional (IEC – *International Electrotechnical Commission*) e o IEEE – Instituto dos Engenheiros Electrotécnicos e Electrónicos - tem elaborado normas visando limitar os conteúdo harmónico nos sistemas eléctricos. Ao mesmo tempo, fabricantes e utilizadores de equipamentos de electrónica de potência têm vindo a desenvolver soluções para os problemas existentes.

No âmbito da Comunidade Europeia, no sentido da harmonização da legislação sem a qual ficaria afectada a livre troca de bens e serviços, várias directivas foram publicadas tendentes a eliminar as diferenças na legislação dos diferentes estados. Uma dessas directivas é a Directiva de Conselho n.º 85/374 sobre responsabilidade por produtos defeituosos. O seu Art.º 2º define a electricidade como um produto, e como tal tornou-se necessário definir as suas características, o que originou a norma europeia EN 50160.

Norma NE/EN 50160

“Características da Tensão Fornecida pelas Redes Públicas de Distribuição” – Esta norma, publicada pelo CÉNÉLEC (Comité Europeu de Normalização Electrotécnica), define, no ponto de fornecimento ao consumidor (PCC – *point of common coupling*), as características principais da tensão para as redes públicas de abastecimento de energia em baixa-tensão e média-tensão, tais como: frequência, amplitude, forma de onda, cavas de tensão, sobretensões, harmónicos e inter-harmónicos de tensão, simetria das tensões trifásicas, transmissão de sinais de informação pelas redes de energia [10].

Para as redes de baixa-tensão (BT), relativamente aos harmónicos de tensão, nas conduções normais de exploração, durante o período de uma semana, 95% dos valores eficazes de cada harmónico de tensão (valores médios em cada 10 minutos), não devem ultrapassar os valores indicados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores dos primeiros 25 harmónicos de tensão nos pontos de fornecimento, expressos em percentagem da tensão nominal U_N .

Harmónicos ímpares				Harmónicos pares	
Não múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem n	Tensão relativa (%)	Ordem n	Tensão relativa (%)	Ordem n	Tensão relativa (%)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 - 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

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

Além disso, esta norma especifica que a taxa de distorção harmónica total da tensão fornecida (tendo em conta os primeiros 40 harmónicos) não deverá ultrapassar 8%.

Para as redes de média-tensão aplica-se a mesma tabela, com a observação de que o valor do harmónico de ordem 3, dependendo da concepção da rede, pode ser muito mais baixo.

Norma CEI/IEC 61000

A série 61000 de normas CEI (Comissão Electrotécnica Internacional) [11-13] diz respeito à compatibilidade electromagnética e compreende as seguintes partes:

- 1) Generalidades – considerações gerais, definições, terminologia, etc. (61000-1-x).
- 2) Ambiente – descrição do ambiente, características do ambiente onde vai ser instalado o equipamento, níveis de compatibilidade (61000-2-x).

- 3) Limites – limites de emissão, definindo os níveis de perturbação permitidos pelos equipamentos ligados à rede de energia eléctrica, limites de imunidade (61000-3-x).
- 4) Ensaio e medidas – técnicas de medida e técnicas de ensaio de modo a assegurar a conformidade com as outras partes da norma (61000-4-x)
- 5) Guias de instalação e de atenuação – providencia guias para a aplicação em equipamentos, tais como filtros, equipamentos de compensação, descarregadores de sobretensões, etc., para resolver problemas de qualidade da energia (61000-5-x).
- 6) Normas gerais e de produto – definem os níveis de imunidade requeridos pelos equipamentos em geral ou para tipos específicos de equipamentos (61000-6-x).

Os níveis de compatibilidade electromagnética são especificados de acordo com o vocabulário electrotécnico internacional, CEI 60050(161) VEI. Define-se:

- Nível de emissão: nível máximo permitido para um consumidor de uma rede pública ou para um aparelho.
- Nível de compatibilidade: nível máximo especificado de perturbação que se pode esperar num dado ambiente.
- Nível de imunidade: nível de perturbação suportado por um aparelho ou sistema.
- Nível de susceptibilidade: nível a partir do qual um aparelho ou sistema começa a funcionar deficientemente.

A norma CEI 61000-2-2 define os níveis de compatibilidade para os harmónicos de tensão para redes de baixa-tensão, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Níveis de compatibilidade para os harmónicos de tensão em redes públicas de BT.

Harmónicos ímpares não múltiplos de 3		Harmónicos ímpares múltiplos de 3		Harmónicos pares	
Ordem n	Tensão harm. (%)	Ordem n	Tensão harm. (%)	Ordem n	Tensão harm. (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2 + 0,5 \times 25/n$				

Por sua vez a norma CEI 61000-2-4 estabelece os níveis de compatibilidade para redes industriais (Tabela 3). Definem-se 3 classes com exigência de compatibilidade diferentes em função dos ambientes electromagnéticos possíveis:

Classe 1 – Aplica-se a redes protegidas e tem níveis de compatibilidade mais baixos do que os das redes públicas. Diz respeito à utilização de aparelhos muito sensíveis às perturbações da rede eléctrica, como por exemplo: instrumentação de laboratórios tecnológicos, certos equipamentos de automação e de protecção, certos computadores, etc.

Classe 2 – Esta classe aplica-se aos PAC (Ponto de Acoplamento Comum à rede pública) e aos pontos de ligação interna nos ambientes industriais em geral. Os níveis de

compatibilidade desta classe são idênticos aos das redes públicas, pelo que os equipamentos destinados à utilização nestas redes podem ser usados nesta classe de ambiente industrial.

Classe 3 – Esta classe aplica-se somente aos pontos de ligação interna dos ambientes industriais. Os níveis de compatibilidade são superiores aos da classe 2 para certas perturbações. Esta classe deve ser considerada, por exemplo, quando uma das seguintes condições é satisfeita: a maior parte das cargas são alimentadas através de conversores; existem máquinas de soldar; ocorrem arranques (partidas) frequentes de motores de grande potência; as cargas variam rapidamente.

Tabela 3 - Níveis de compatibilidade para harmónicos.

	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Distorção harmónica total	5%	8%	10%

Refira-se que os limites máximos individuais dos harmónicos de tensão e a taxa de distorção total impostos pela norma europeia NE/EN 50160 coincidem com os valores das normas CEI 61000-2-2 e 61000-2-4, classe 2 para ambientes industriais.

Norma ANSI/IEEE 519 – 1992

De acordo com esta norma, as empresas distribuidoras são responsáveis pela manutenção da qualidade da tensão em todos os seus sistemas [14]. A norma estipula os limites de distorção para os diferentes níveis de tensão a observar nas redes eléctricas, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Limites máximos de distorção.

Tensão nominal no PAC (U_n)	Distorção harmónica individual (%)	Distorção harmónica total (%)
$U_n \leq 69$ kV	3,0	5,0
69 kV < $U_n \leq 161$ kV	1,5	2,5
$U_n > 161$ kV	1,0	1,5

MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉCTRICA

A utilização de monitorizadores de qualidade de energia é a melhor forma de detectar e diagnosticar problemas nos sistemas eléctricos de potência. Estes equipamentos permitem, basicamente, medir e registar ao longo do tempo valores de tensões, correntes e potências em vários canais. Com base na informação que vai sendo recolhida é então possível gerar alarmes (eventualmente em tempo real) e produzir relatórios de diversos tipos, seleccionando aplicações tais como:

Aplicação “Osciloscópio e Distorção Harmónica” – O equipamento funciona como um osciloscópio de vários canais e permite ainda calcular valores médios, “*true rms*”, máximos e mínimos, de tensões e correntes. Pode ainda identificar os harmónicos e calcular os valores do conteúdo harmónico total (THD – “*Total Harmonic Distortion*”). Na Figura 5 apresenta-se um exemplo de uma janela produzida por uma aplicação teste tipo.

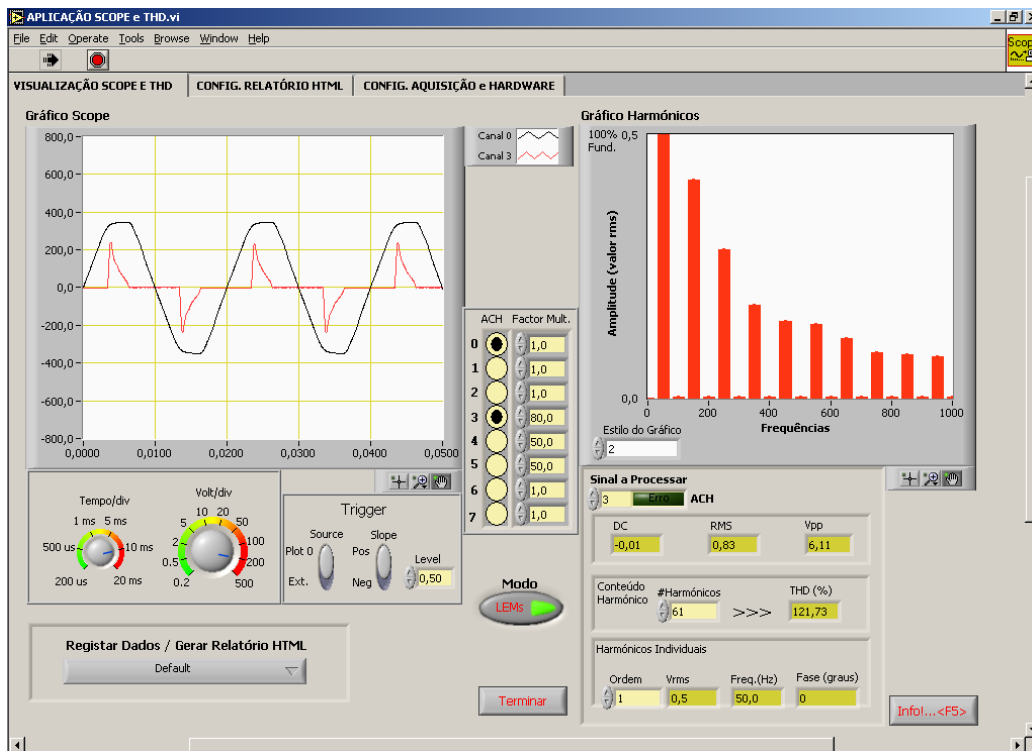


Figura 5 – Janela de interface da aplicação “Osciloscópio e Distorção Harmónica”.

Aplicação “Forma de Onda” – Permite detectar anomalias nas formas de onda das tensões, armazenando esses eventos juntamente com o instante da ocorrência.

Aplicação “Sobretensões e Subtensões Momentâneas” – Detecta e regista estes fenómenos, juntamente com o instante em que ocorrem e a sua duração.

Aplicação “Grandezas Clássicas” – Permite o cálculo de valores de amplitude e fase de tensões e correntes, impedâncias, potências aparente, activa e reactiva, factor de potência medidas de energia, valores relativos a desequilíbrios de fases, etc.

No mercado existe um leque bastante variado de equipamentos para monitorizar a qualidade da energia eléctrica. Contudo, estes equipamentos são normalmente muito caros, sobretudo os que apresentam bons desempenhos e múltiplas funções. Por essa razão é ainda hoje interessante desenvolver sistemas de monitorização virtuais baseados na utilização de PC’s, placas de aquisição de dados *standard* e ferramentas de desenvolvimento do tipo LabView, uma vez que é possível conseguir soluções com características interessantes a custos muito mais baixos.

SOLUÇÕES PARA OS PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉCTRICA

A solução para os problemas de qualidade de energia eléctrica tradicionais (exceptuando as interrupções de serviço prolongadas) passa pela utilização de alguns dos seguintes condicionadores de rede eléctrica:

- Os varístores (TVSS – *Transient Voltage Surge Suppressors*) garantem protecção contra picos de tensão nas linhas.
- Os filtros de interferência electromagnética ajudam a prevenir o problema dos micro-cortes de tensão e garantem que o equipamento poluidor não conduz ruído de alta-frequência para a rede eléctrica.

- Os transformadores de isolamento com blindagens electrostáticas garantem não só isolamento galvânico como também evitam picos de tensão de modo comum ou entre linhas.
- Os transformadores ferro-ressonantes asseguram a regulação de tensão bem como a filtragem de picos de tensão entre linhas.
- A regulação de tensão pode também ser garantida por meio de transformadores com várias saídas associados a um esquema electrónico de comutação por meio de triacs ou tirístores montados em antiparalelo.

As interrupções prolongadas de fornecimento de energia eléctrica obrigam à utilização de fontes de alimentação sem-interrupção (UPS's) ou a qualquer outra forma alternativa de geração de energia, como os geradores de emergência.

A solução para alguns problemas de qualidade de energia eléctrica obriga à utilização de conversores comutados (ou ressonantes). É o caso do problema dos harmónicos que em seguida se aborda de forma um pouco mais detalhada.

Soluções para o Problema dos Harmónicos

De forma a cumprir com as regulamentações europeias sobre harmónicos (normas IEC) os equipamentos de electrónica de potência devem ser concebidos dentro das normas, ou então, filtros passivos ou activos devem ser previstos à entrada do equipamento original.

Equipamentos de baixa potência (Alimentação Monofásica)

O mais simples dos filtros passivos consiste num indutor em série com a entrada do equipamento poluidor, frequentemente um rectificador com um filtro capacitivo na saída (Figura 6 (a)). Trata-se de uma solução fiável e de baixo custo. Contudo, a bobina é pesada (devido ao ferro do seu circuito magnético) e ocupa muito espaço, o que limita praticamente esta solução a equipamentos de baixa potência (< 600 VA).

Uma alteração muito comum feita no projecto de equipamentos electrónicos monofásicos, de forma a reduzir significativamente os harmónicos produzidos, consiste na utilização de um conversor cc-cc do tipo *step-up* após a ponte rectificadora (Figura 6 (b)). Esse circuito, quando correctamente controlado, permite que a corrente consumida pelo equipamento seja praticamente sinusoidal, podendo ser usado até à potência normalmente disponível nas tomadas monofásicas (3 kVA). Embora os problemas de peso e espaço aqui não se coloquem, a solução apresenta como desvantagens o custo relativamente elevado, a pouca fiabilidade, e o facto de injectar ruído de alta-frequência na linha, devido à comutação do dispositivo semiconductor de potência (o que requer um filtro adicional).

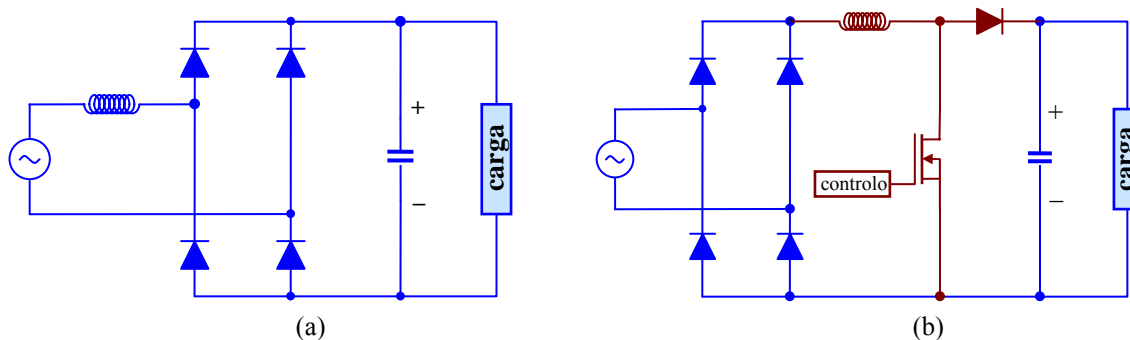


Figura 6 – Soluções para redução dos harmônicos de corrente à entrada dos equipamentos:
(a) indutor em série; (b) conversor *step-up*.

Equipamentos de Média e Alta Potência

Ao contrário dos equipamentos de baixa potência, os equipamentos industriais, que podem ter potências desde alguns kW até vários MWs, não estão sujeitos à obrigatoriedade do cumprimento de normas relativas à “poluição” harmónica por eles produzida. A norma da IEC 61000 que cobre estes casos, ainda não está terminada, existindo apenas em forma de esboço. A norma IEEE 519-1992 cobre aplicações de alta potência, mas o seu cumprimento não é obrigatório.

Durante muito tempo, as companhias de distribuição de energia eléctrica impunham aos consumidores industriais apenas limites para a potência reactiva consumida. A solução normalmente adoptada pelas indústrias consiste na utilização de bancos de condensadores para correcção do o factor de potência da instalação, colocando-o dentro dos limites impostos pela companhia distribuidora.

Mais recentemente, as companhias distribuidoras de alguns países que já têm preocupações com os harmónicos de corrente que circulam na rede eléctrica, obrigam os consumidores a aplicar técnicas de redução de harmónicos baseadas em filtros passivos. Contudo esta solução apresenta várias desvantagens, nomeadamente: apenas filtram as frequências para as quais foram previamente sintonizados; quando as tensões de alimentação estão distorcidas, mesmo que moderadamente, os filtros passivos absorvem valores de elevados de corrente, nas frequências harmónicas para as quais estão sintonizados; precisam frequentemente de ser sobredimensionados, uma vez que como não é possível limitar a sua operação a uma certa carga (muitas vezes acabam por absorver harmónicos de outras cargas ligadas ao sistema eléctrico; podem ocorrer fenómenos de ressonância entre o filtro passivo e as outras cargas ligadas à rede, com resultados imprevisíveis; o dimensionamento dos filtros passivos deve ser coordenado com as necessidades de potência reactiva da carga, sendo difícil fazê-lo de forma a evitar-se que o conjunto opere com factor de potência capacitivo em algumas condições de funcionamento.

Para ultrapassar estas desvantagens, têm sido feitos recentemente esforços no sentido de desenvolver filtros activos de potência [15-17].

Filtro Activo Paralelo

O filtro activo de potência do tipo paralelo tem como função compensar os harmónicos das correntes nas cargas, podendo ainda compensar a potência reactiva (corrigindo o factor de potência). Permite ainda compensar a componente de sequência zero da corrente, equilibrando as correntes nas três fases (e eliminando a corrente no neutro) Ou seja, a rede eléctrica passa a ver o conjunto constituído pelo filtro activo e pelas cargas como se tratasse se um receptor trifásico equilibrado do tipo resistivo. Conforme se mostra na Figura 7, como resultado da

actuação do filtro activo paralelo, a corrente nas linhas torna-se sinusoidal, e a sua amplitude diminui, reduzindo o aquecimento (as perdas) dos condutores, e evitando distorções nas tensões de alimentação dos receptores.

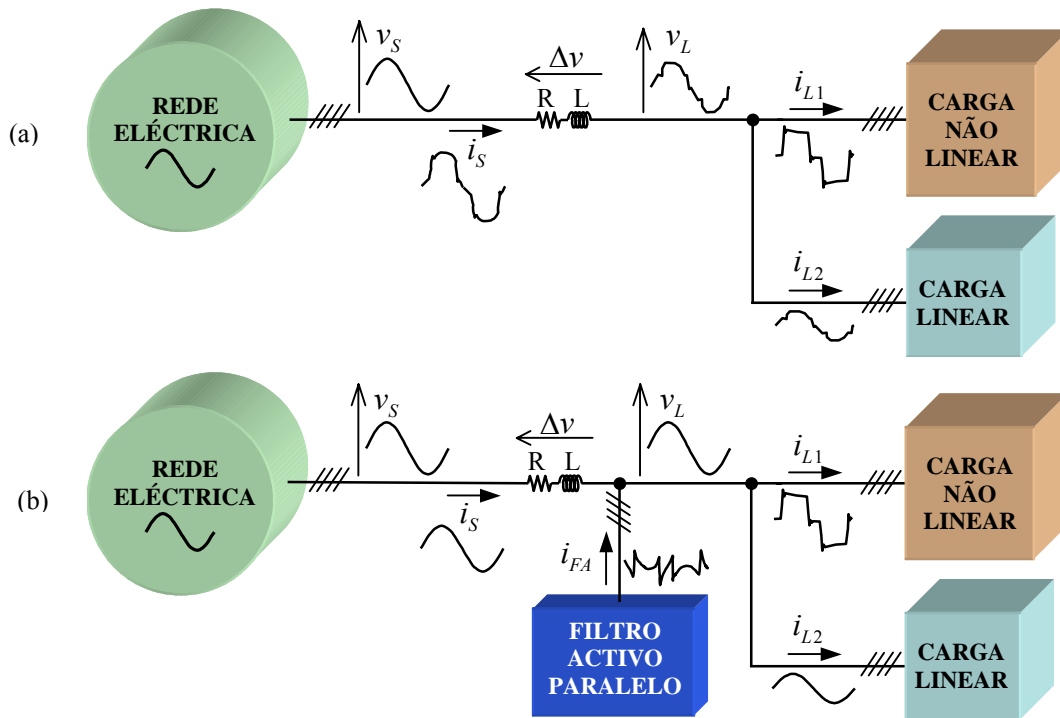


Figura 7 – Operação de um sistema eléctrico com carga não linear:
 (a) sem compensação; (b) com compensação por um filtro activo paralelo.

Na Figura 8 apresenta-se o esquema eléctrico de um filtro activo paralelo trifásico. O filtro é, basicamente, composto por um inversor fonte de tensão com controlo de corrente e o respectivo controlador. O controlador, a partir da medida dos valores instantâneos das tensões das fases (v_a, v_b, v_c) e das correntes na carga (i_a, i_b, i_c), produz as correntes de compensação de referência ($i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*, i_{cn}^*$) para o inversor. O inversor injecta as correntes de compensação ($i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}, i_{cn}$) requeridas pela carga, de forma que as correntes nas fases da rede eléctrica (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}) passam a ser sinusoidais e equilibradas, fazendo com que a corrente no neutro da rede eléctrica (i_{sn}) assuma um valor nulo.

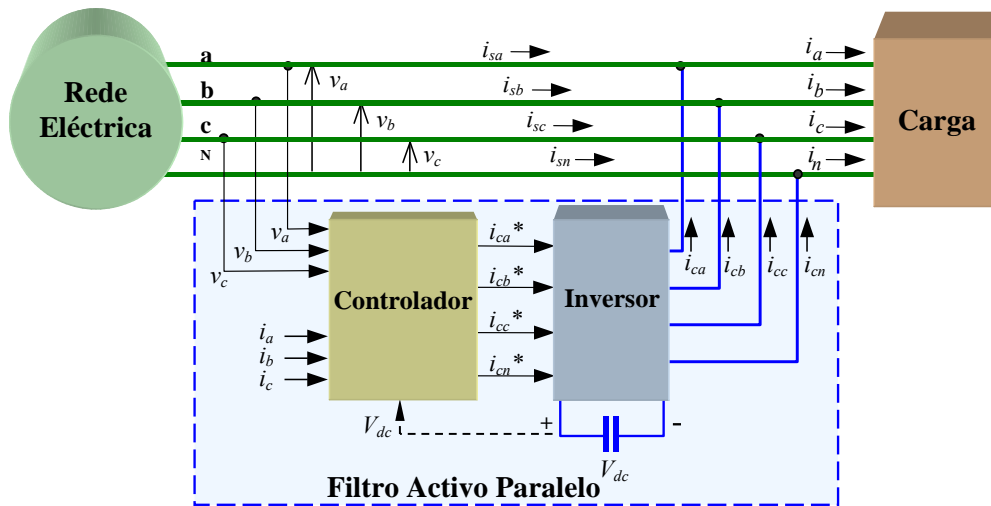


Figura 8 – Esquema de um filtro activo paralelo.

Filtro Activo Série

O filtro activo de potência do tipo série (Figura 9) é o dual do filtro activo paralelo. A sua função é compensar as tensões da rede eléctrica (v_{sa} , v_{sb} , v_{sc}), para os casos em que estas contenham harmónicos, de forma a tornar as tensões na carga (v_a , v_b , v_c) sinusoidais. Em certos casos, dependendo da duração dos fenómenos e da energia que o filtro activo puder disponibilizar, é ainda possível compensar sobretensões, subtensões ou interrupções momentâneas.

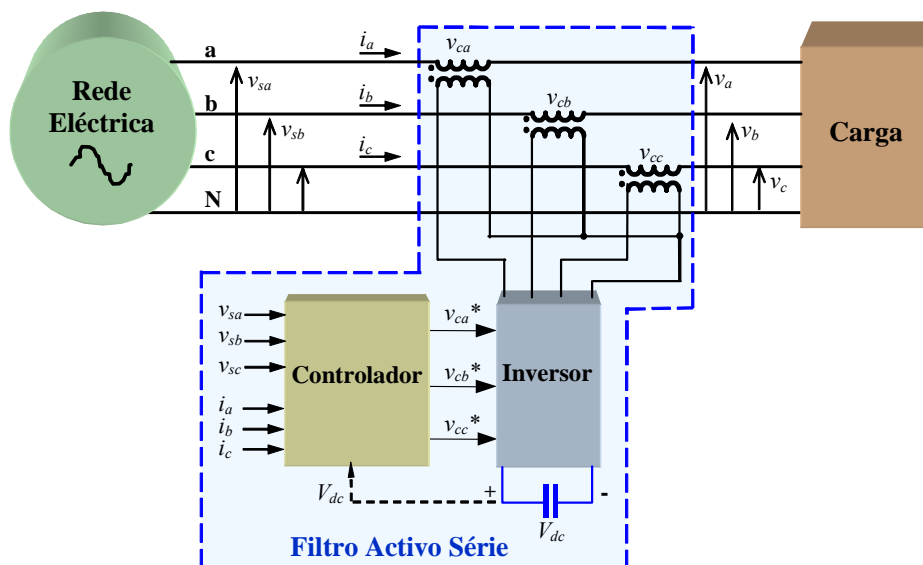


Figura 9 – Esquema de um filtro activo série.

TEORIAS PARA ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉCTRICOS COM HARMÓNICOS

A teoria clássica de análise de circuitos de corrente alternada em regime permanente e para formas de onda de tensão e corrente sinusoidais não é apropriada para o tratamento de sistemas com harmónicos.

Têm surgido diversas teorias [18-22] que permitem lidar com os problemas resultantes do aparecimento de harmónicos na rede eléctrica. Destas destaca-se a “teoria geral da potência

reactiva instantânea em sistemas trifásicos”, também conhecida por “teoria p-q”, desenvolvida pelo Prof. Akagi, [19,20]. A aplicação desta teoria implica, basicamente, uma transformação de coordenadas das tensões e correntes dos eixos $a-b-c$ (sistema trifásico normal) para os eixos $\alpha-\beta-0$, e o subsequente cálculo das potências nesse novo referencial: p (potência real instantânea), q (potência imaginária instantânea) e p_0 (potência instantânea de sequência zero). À luz desta teoria conclui-se que, para que os filtros activos cumpram o seu objectivo, devem permitir anular as componentes de potência q , p_0 , e a componente alternada da potência p .

CONCLUSÃO

Neste texto apresentou-se, de forma sucinta, um assunto actual e de grande relevância para as indústrias em geral: o problema da qualidade de energia eléctrica. Mercê da utilização crescente e generalizada de equipamentos de electrónica de potência, que “poluem” os sistemas eléctricos, e da necessidade de automatização dos sistemas de produção, que obriga a que cada vez mais se utilizem controladores electrónicos, extremamente sensíveis ao meio electromagnético em que estão inseridos, a atenção dada a qualidade da energia eléctrica é crucial tendo em vista a garantia da qualidade do produto final e a redução de custos de produção.

O investimento em equipamentos de baixa potência tendo em vista a solução dos problemas de qualidade de energia eléctrica resultante dos harmónicos pode pagar-se em poucos anos, mesmo que se contabilizem apenas as perdas nos transformadores e condutores do sistema de alimentação da indústria.

Muitos dos problemas de qualidade de energia podem fazer com que alguns equipamentos funcionem de forma incorrecta e levar à interrupção de processos de fabrico com prejuízos muito elevados. Tais problemas podem ser resolvidos quando as suas causas são identificadas e se adoptam as medidas apropriadas para a sua correcção.

O Departamento de Electrónica Industrial da Universidade do Minho vem desenvolvendo esforços nos últimos anos de forma a capacitar-se a resolver problemas na área da Qualidade de Energia Eléctrica. No momento encontram-se em andamento projectos para o desenvolvimento de equipamentos monitorizadores de qualidade de energia eléctrica, e de filtros activos de potência. Espera-se começar em breve um trabalho de levantamento dos problemas de qualidade de energia em indústrias portuguesas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), financiadora do Projecto POCTI/ESE/41170/2001.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gerg Mazurkiewicz, http://www.achrnews.com/CDA/ArticleInformation/features/BNP__Features__Item/0,1338,62014,00.html, 2001.
- [2] IEEE Task Force, Effects of Harmonics on Equipments, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 2, pp. 672-680, Abril de 1993.
- [3] Henderson, R. D., Rose P. J., Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers, IEEE Trans. Industry Applications, vol. 30, pp. 528-532, 1994.
- [4] Fuchs, Roesler, Alashab, Sensitivity of Electrical Appliances to Harmonics and Fractional Harmonics of the Power System's Voltage. Part I: Transformers and Induction

- Machines, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 2, pp. 435-444, Abril de 1987.
- [5] Girgis, Nims, Jacamino, Dalton, Bishop, Effect of Voltage Harmonics on the Operation of Solid State Relays in Industrial Applications, Proc. IAS, pp. 1821-1828, 1990.
 - [6] Cavallini A., Ghinello I., Mazzanti G., Montanari G. C., Considerations on the Life Performance and Installation Practice of Shunt Capacitors in the Presence of Harmonics Generated by Ac/Dc Converters, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 14, no. 1, Jan. 1999.
 - [7] Cavalcante, F., Stephan R., Mello A., Américo M., Harmonic Effects on Electrical Measurement Instruments, Proc. IEEE, pp. 531-536, 1996.
 - [8] IEEE Working Group, "Power Lines Harmonics Effects on Communication Line Interference", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 9, pp. 2578-2587, Set. 1985.
 - [9] Richard Redl, Paolo Tenti e J. Daan Van Wyk, "Power Electronics Polluting Effects", IEEE Spectrum, Maio de 1997, pp. 33-39.
 - [10] CENELEC NE/EN 50160: Caractéristiques de la Tension Fournie par les Réseaux Publics de Distribution, Nov. 1994.
 - [11] CEI/IEC 61000-2-1: Description of the environment – Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signaling in public power supply systems, 1st. Ed. 1990-05.
 - [12] CEI/IEC 61000-2-2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems, 1st. Ed. 1990-05.
 - [13] CEI/IEC 61000-2-4: Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances, 1st. Ed. 1994-02.
 - [14] IEEE STANDARD 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1992.
 - [15] Afonso, J. L., Silva, H. R., Martins, J. S., Active Filters for Power Quality Improvement, IEEE Porto Power Tech'2001, Porto, Portugal, 10-13 Set. 2001.
 - [16] Afonso, J. L., Martins, J. S., Couto, C., Active Filters with Control Based on the p-q Theory, IEEE Industrial Electronics Society Newsletter, vol. 47, nº 3, Setembro de 2000.
 - [17] Afonso, J. L., Aredes, M., Watanabe, E., Martins, J. S., Shunt Active Filter for Power Quality Improvement, International Conference UIE 2000, Lisboa, Portugal, 1 a 4 de Novembro de 2000.
 - [18] Depenbrock, M., Skudelny, H., Dynamic Compensation of Non-Active Power Using the FBD-Method – Basic Properties Demonstrated by Benchmark Examples, ETEP - Eur. Trans. Elect. Power Eng., vol. 4, no. 5, pp. 381-388, Sept/Oct 1994.
 - [19] Marques, G. D., "A Comparison of Active Power Filter Control Methods in Unbalanced and Non-sinusoidal Conditions", IESC, IECON'98, Ago.- Set., pp. 444-449.
 - [20] Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A., Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits, IPEC'83 - Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983, pp. 1375-1386.
 - [21] Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A., Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", IEEE Trans. Industry Applic., vol. 20, May/June 1984.
 - [22] Watanabe, E. H., Stephan, R. M., Aredes, M., New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 2, pp. 697-703, April 1993.