

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉCTRICA

João Luiz Afonso Júlio S. Martins

Departamento de Electrónica Industrial - Universidade do Minho

RESUMO

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 nos sistemas de potência. Os prejuízos económicos resultantes deste e de outros problemas associados aos 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.

Este artigo aborda 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.

1 - INTRODUÇÃO

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 1a).

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. A Figura 1b apresenta as formas de onda de corrente e tensão numa das fases de uma carga trifásica não-linear típica (rectificador trifásico de onda completa com filtro capacitivo). Como se pode observar a corrente está longe de ser sinusoidal, e como consequência, a tensão de alimentação fica distorcida.

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.

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 [1-3].

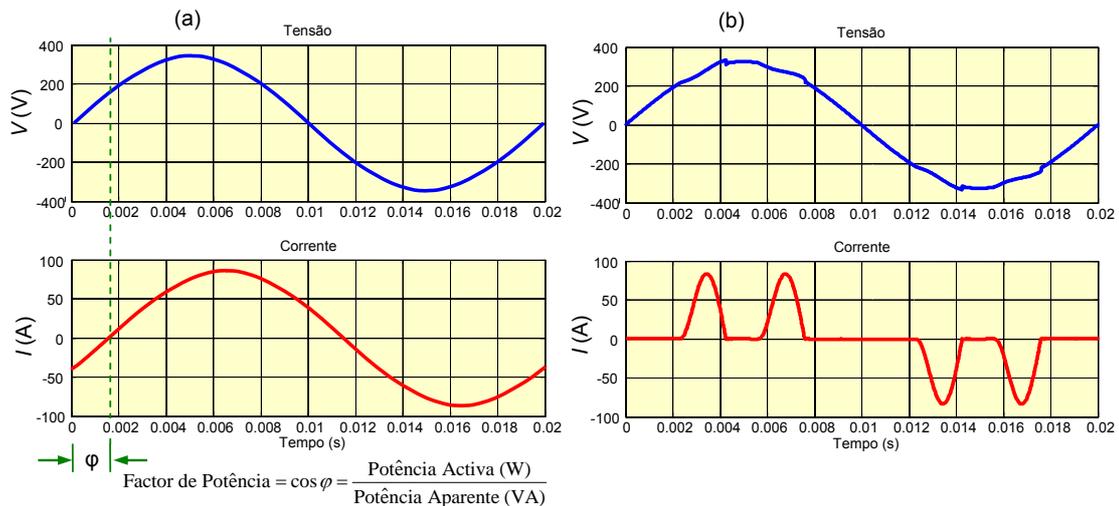


Figura 1 – Tensão e corrente num sistema eléctrico: (a) Com cargas lineares; (b) Com uma carga não linear

2 - PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉCTRICA

Entre os problemas de qualidade de energia eléctrica, a interrupção do fornecimento é, incontestavelmente, o mais grave, uma vez que afecta todos os equipamentos ligados à rede eléctrica. Contudo, outros problemas, como os descritos a seguir e ilustrados na Figura 2, 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, por exemplo, 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*): consistem em pequenos cortes periódicos na forma de onda da tensão, que resultam de quedas de tensão nas indutâncias do sistema eléctrico, ocorridas devido a cargas que consomem correntes com variações bruscas periódicas (caso dos rectificadores com filtro capacitivo ou indutivo).
- Transitórios: ocorrem como resultado de fenómenos transitórios, tais como a comutação de bancos de condensadores ou descargas atmosféricas.

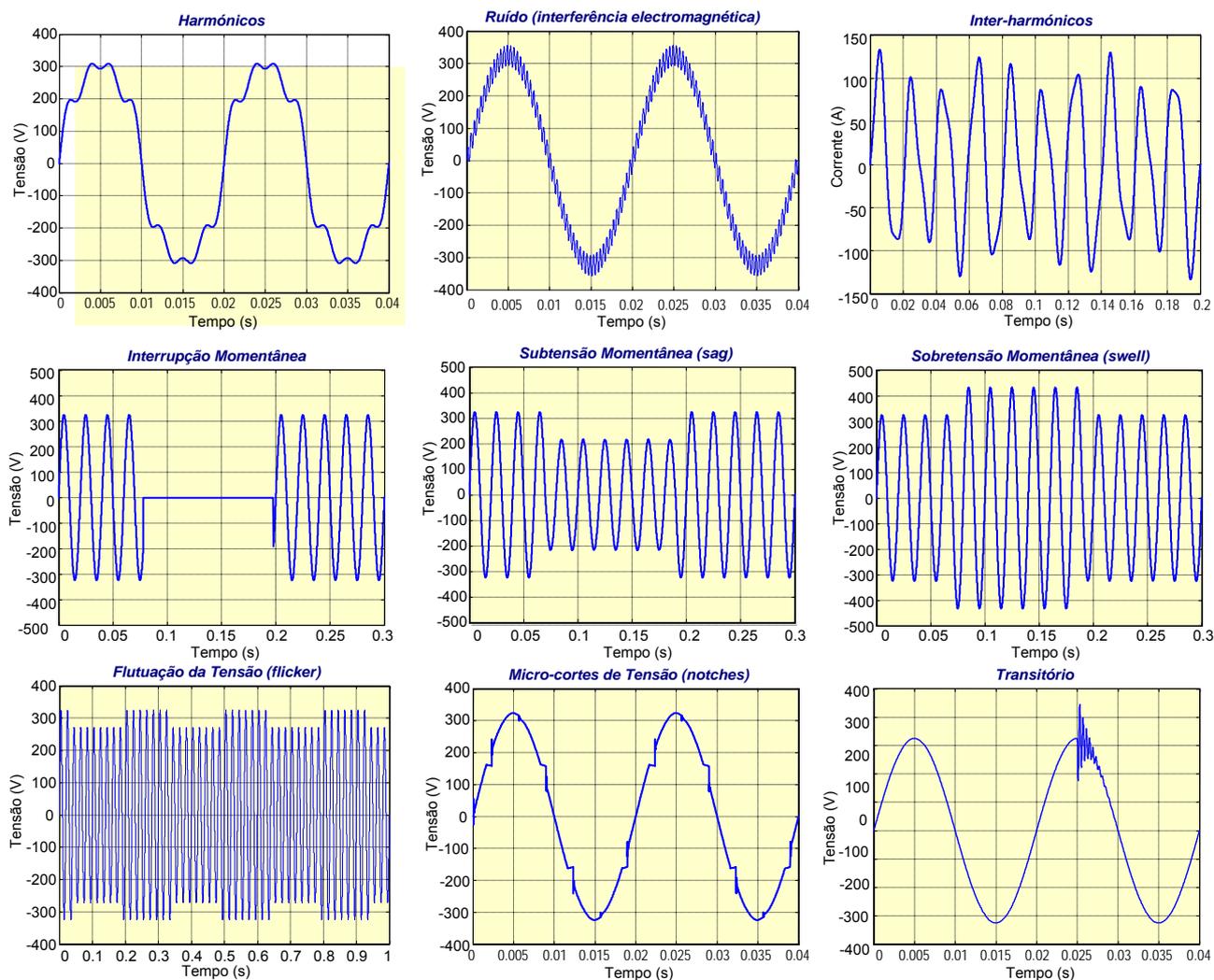


Figura 2 - Problemas de qualidade de energia eléctrica

2.1 - 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, deve-se à crescente utilização de equipamentos electrónicos alimentados pela rede eléctrica, tais como computadores, impressoras, 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 3. O elevado conteúdo harmónico da corrente distorce a tensão nos receptores devido à queda de tensão nas impedâncias do sistema de alimentação.

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.

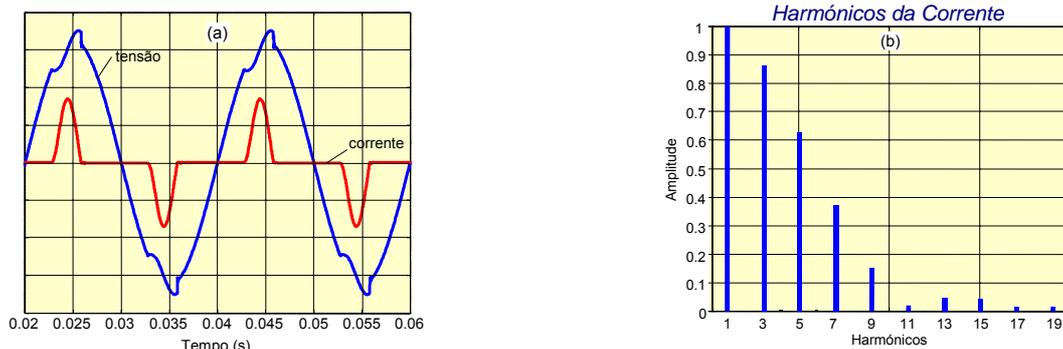


Figura 3 – Rectificador monofásico com filtro capacitivo: (a) formas de onda da tensão e da corrente de entrada; (b) harmônicos da corrente (valores normalizados)

2.2 - 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 [4, 5]:

- 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).

2.3 - CASOS REAIS DE PROBLEMAS PROVOCADOS POR HARMÓNICOS

Um novo sistema de computação foi instalado num prédio pertencente a uma companhia de seguros. Uma vez ligada a alimentação o disjuntor principal disparou, cortando a alimentação de todo o sistema. Após várias verificações, os engenheiros descobriram que a interrupção tinha sido provocada 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 edifícios comerciais. Isto se deve à 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 de 3º ordem, tais como o 3º, o 9º e o 15º harmónicos. Para que se evitem problemas de sobreaquecimento dos condutores de neutro,

estes devem ser sobredimensionados, ou, melhor ainda, os harmónicos de 3ª ordem devem ser compensados.

Noutro caso documentado, uma companhia de distribuição de energia eléctrica reportou a avaria de um transformador de 300 kVA cuja carga não excedia o seu valor nominal de potência aparente. O transformador foi substituído por outro idêntico, e este apresentou os mesmos problemas pouco tempo depois. A carga desses transformadores consistia sobretudo em sistemas de accionamento electrónico de velocidade variável para motores eléctricos, cujo consumo de correntes possui elevado conteúdo harmónico.

Actualmente, de forma a evitar que os transformadores avariem, ou tenham o seu tempo de vida útil reduzido, é importante que se conheça a distorção harmónica das correntes que estes fornecem às cargas, de forma que, em função desse valor, seja aplicado ao transformador um factor de desclassificação de potência (factor K – *derating factor*). Ou seja, em função da distorção harmónica, é reduzido o valor da potência nominal do transformador.

3 - 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 possível gerar alarmes e produzir relatórios de diversos tipos, através da selecção de diferentes aplicações.

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 monitorizadores de baixo custo. O Departamento de Electrónica Industrial da Universidade do Minho desenvolveu um sistema de monitorização baseado na utilização de um PC com uma placa de aquisição de dados *standard*, e no *software LabView* (Figura 4). A seguir são descritas as aplicações que este sistema de monitorização apresenta [6]:

Aplicação “Osciloscópio e Distorção Harmónica” – O monitorizador funciona como um osciloscópio de vários canais, que 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*”). A Figura 5 apresenta um exemplo da interface desta aplicação.

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 “Gestão de Consumos” – 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.

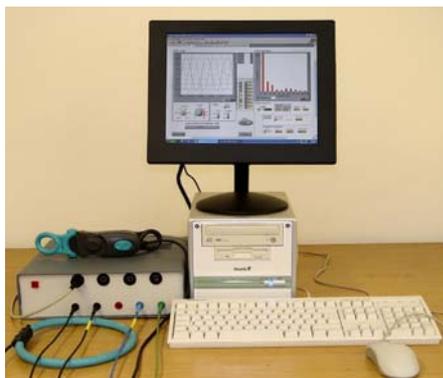


Figura 4 – Sistema de Monitorização

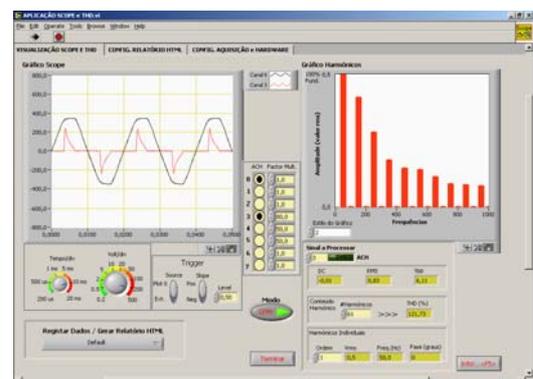


Figura 5 – Interface da aplicação “Osciloscópio e Distorção Harmónica”

4 - SOLUÇÕES PARA OS PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉCTRICA

A solução para alguns dos problemas de qualidade de energia eléctrica mais tradicionais passa pela utilização dos seguintes dispositivos ou equipamentos:

- As fontes de alimentação ininterrupta (UPS's - *Uninterruptable Power Supplies*) ou os geradores de emergência são as únicas soluções para as interrupções prolongadas no fornecimento de energia eléctrica.
- Os supressores de transientes, ou varístores (TVSS – *Transient Voltage Surge Suppressors*) garantem protecção contra os fenómenos transitórios, que causam picos de tensão nas linhas.
- Os filtros de interferência electromagnética 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 a propagação de picos de tensão ao secundário.
- Os transformadores ferro-ressonantes asseguram a regulação de tensão, bem resolvem os problemas de sobretensão.
- A regulação de tensão pode também ser garantida por meio de transformadores com várias saídas associados a um esquema electrónico de comutação por meio tirístores.

4.1 – SOLUÇÕES PARA O PROBLEMA DOS HARMÓNICOS

A seguir são apresentadas algumas soluções tradicionais (filtragem passiva) e modernas (filtragem activa) para o problema dos harmónicos em equipamentos e instalações eléctricas.

Baixa Potência (Alimentação Monofásica)

O mais simples dos filtros passivos consiste num indutor em série com a entrada do “equipamento poluidor”, que frequentemente consiste num rectificador com um filtro capacitivo na saída (Figura 6a). Trata-se de uma solução fiável e de baixo custo. Contudo, o indutor é pesado (devido ao ferro do seu circuito magnético) e ocupa muito espaço, o que limita praticamente esta solução a equipamentos de baixa potência (inferior a 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 6b). Esse circuito, quando correctamente controlado, permite que a corrente consumida pelo equipamento seja praticamente sinusoidal, podendo ser utilizado até à potência normalmente disponível nas tomadas monofásicas (cerca de 3 kVA).

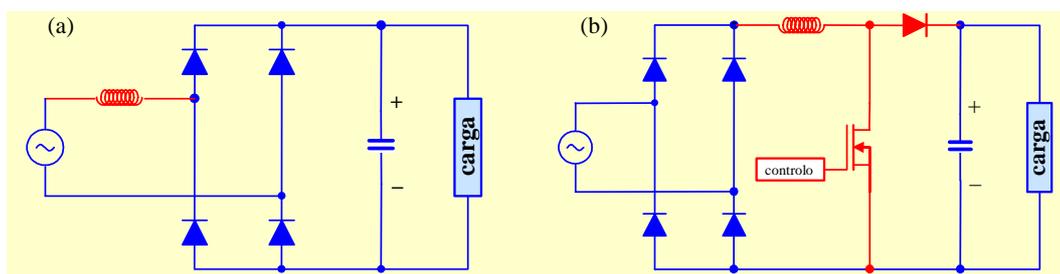


Figura 6 – Soluções para redução dos harmónicos de corrente à entrada dos equipamentos:
(a) indutor em série; (b) conversor *step-up*

Média e Alta Potência

Durante muito tempo, as companhias de distribuição de energia eléctrica têm imposto aos consumidores industriais apenas limites para a potência reactiva consumida. A solução normalmente adoptada pelas indústrias tem consistido na utilização de bancos de condensadores para correcção do factor de potência da instalação.

Mais recentemente, os problemas com os harmónicos de corrente que circulam na rede eléctrica, têm obrigado muitos consumidores industriais a aplicar técnicas de redução de harmónicos

baseadas em filtros passivos. Contudo esta solução apresenta várias desvantagens, nomeadamente: os filtros passivos apenas filtram as frequências para as quais foram previamente sintonizados; precisam frequentemente ser sobredimensionados, uma vez que como não é possível limitar a sua operação a uma certa carga, acabam por absorver harmónicos do próprio 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, recentemente têm sido feitos esforços no sentido de desenvolver filtros activos de potência [7-9].

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 equilibrar as correntes nas três fases (eliminando a corrente no neutro, mesmo na existência de harmónicos de 3ª ordem). 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 as perdas nos condutores, e evitando distorções nas tensões de alimentação dos receptores. A Figura 8 apresenta o esquema eléctrico de um filtro activo paralelo trifásico. O filtro é basicamente composto por um inversor, que produz as correntes de compensação, e pelo seu controlador.

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, para os casos em que estas contenham harmónicos, de forma a tornar as tensões na carga 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 mesmo interrupções momentâneas.

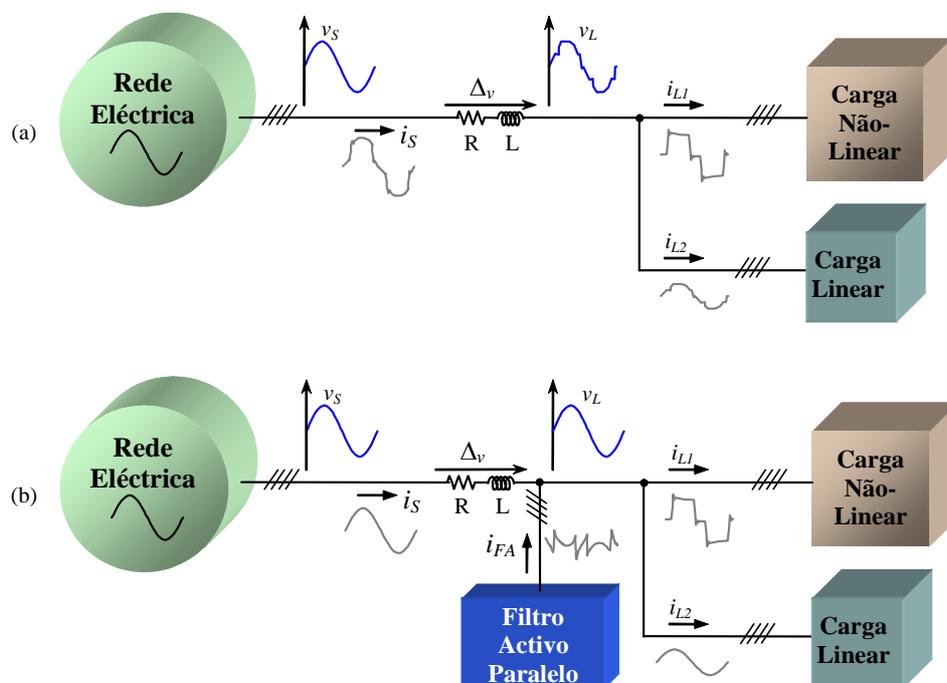


Figura 7 – Operação de um sistema eléctrico com carga não linear:
(a) sem compensação; (b) com compensação por um filtro activo paralelo

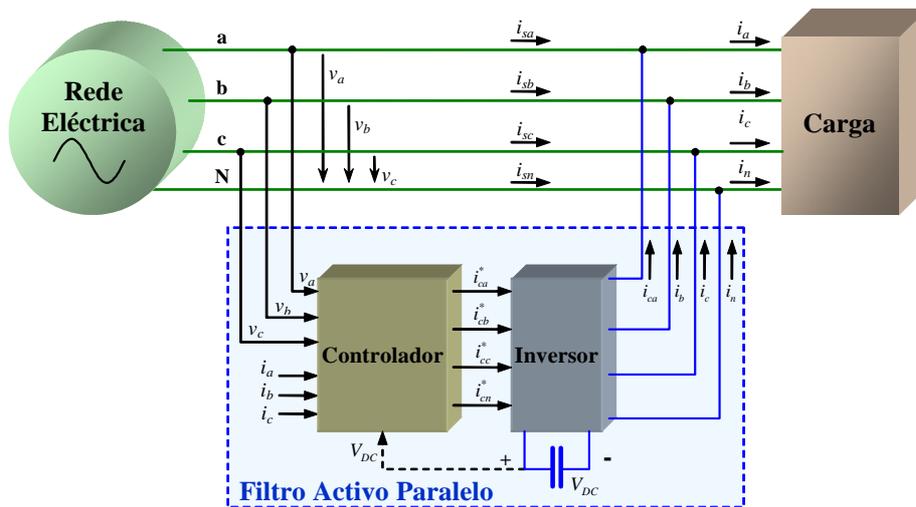


Figura 8 – Esquema de um filtro activo paralelo

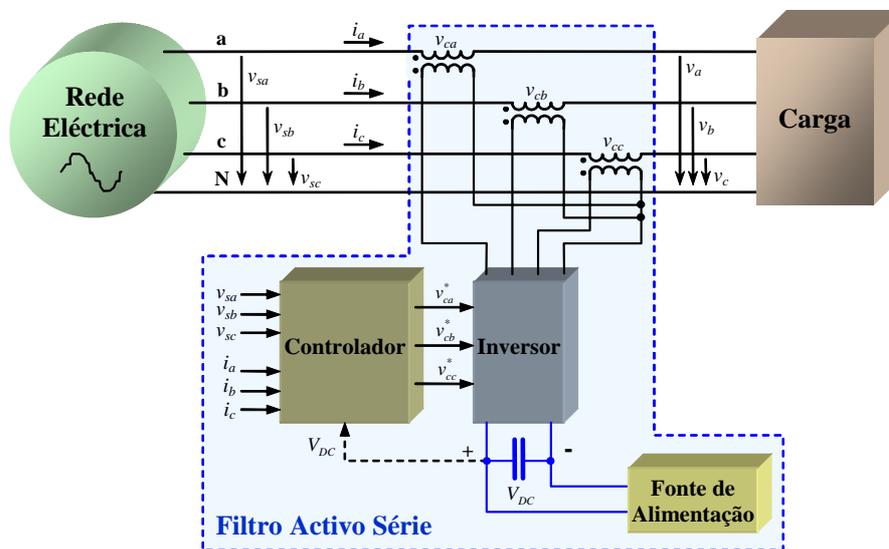


Figura 9 – Esquema de um filtro activo série

5 - CONCLUSÃO

Neste artigo apresentou-se, de forma sucinta, um assunto actual e de grande relevância para as empresas: 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 dos produtos e serviços e a redução dos custos de produção.

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 sujeitas. 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.

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, acarretando em 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 de forma a capacitar-se a resolver problemas na área da Qualidade de Energia Eléctrica. No momento encontram-se em execução projectos para o desenvolvimento de equipamentos para monitorização e compensação por filtros activos de potência de problemas de qualidade de energia eléctrica. Espera-se ainda poder realizar trabalhos 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.

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Standard 519-1992, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", 1992.
- [2] IEC 61000-3-2, "Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current ≤ 16 A per phase)", Amendment 2, 1998.
- [3] EN 50160, "Caractéristiques de la Tension Fournie par les Réseaux Publics de Distribution", 1994.
- [4] IEEE Task Force, "The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads", *IEEE Trans. Power App. and Systems*, vol. 104, no. 9, Set. 1985, pp. 2555-2563.
- [5] R. D. Henderson e P. J. Rose, "Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 30, 1994, pp. 528-532.
- [6] J. Batista, J. S. Martins, J. L. Afonso, "Low-Cost Power Quality Monitor Based on a PC", ISIE'2003 - *IEEE Int. Symp. Ind. Electronics*, R.J., Brasil, 9-11 Jun 2003, ISBN: 0-7803-7912-8.
- [7] H. Akagi, "Trends in Active Power Line Conditioners," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 9, n° 3, Maio 1994, pp. 263-268.
- [8] J. L. Afonso, J. S. Martins, C. Couto, "Active Filters with Control Based on the p-q Theory", *IEEE Industrial Electronics Society Newsletter*, vol. 47, n° 3, Set. 2000.
- [9] J. L. Afonso, M. Aredes, E. Watanabe, J. S. Martins, "Shunt Active Filter for Power Quality Improvement", *Int. Conference UIE 2000*, Lisboa, Portugal, 1-4 Nov. 2000.

para mais informações:

Dep. Electrónica Industrial
Universidade do Minho
Campus de Azurém
4800-058 Guimarães - Portugal
Tel.: 253 510190 Fax: 253 510189
E-mail: jla@dei.uminho.pt jmartins@dei.uminho.pt