

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉCTRICA

(Versão 0.1 Beta 25 Agosto 2011)

“Todo o mundo é composto de mudança” - Luíz Vaz de Camões

por isso

“Aprende sempre e quando souberes bem ensina. Não guardes a sabedoria só para ti. O conhecimento é para ser partilhado “ - Em Homenagem ao Técnico de Electrónica que me disse esta frase quando eu com 15 anos andava pela sua oficina a aprender e praticar

Este tutorial é uma compilação de vários textos e documentos de visualização pública, que aborda o tema da análise e solução dos problemas relacionados com a qualidade da energia eléctrica, na sua vertente mais clássica – perturbações causadas por sobre-tensões e sub-tensões, interrupções de serviço, etc. – e, ainda com mais ênfase, no que diz respeito aos problemas causados pelos harmónicos, decorrentes da utilização de cargas não lineares.

Foi feito com o intuito de juntar num só documento o máximo de informação destinada à auto-aprendizagem de todos os profissionais e demais interessados no tema da energia eléctrica.

Conta com a contribuição de todos os voluntários que o desejem melhorar de modo a ficar mais completo e tecnica ou didaticamente mais correcto

António Subida

Skype:subida

Blog: <http://penanet.blogspot.com>

3R- Reduzir, Reutilizar e Reciclar.

Cuide do Ambiente.

Só temos disponível um planeta Terra.

O planeta habitável mais próximo fica a milhares de anos-luz!

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

INTRODUÇÃO

A análise abaixo baseia-se na recomendação IEEE-519 [4.1] que trata de práticas e requisitos para o controle de harmónicas no sistema eléctrico de potência. No texto da recomendação estão identificadas diversas referências específicas sobre as diferentes causas de perda de qualidade da energia eléctrica.

O número de conversores electrónicos de potência utilizados, sobretudo na indústria, mas também nos consumidores em geral, não para de aumentar. Por causa disso observa-se uma crescente deterioração das formas de onda de corrente e tensão na rede de energia.

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 dos distribuidores. De igual modo os distribuidores exigem cada vez mais que os consumidores assumam a suas responsabilidades consignadas na lei, em termos da obrigação da garantia da qualidade da energia, actuando na prevenção da propagação para a Rede Eléctrica, das perturbações produzidas nos pontos de consumo.

NORMAS

A qualidade da energia eléctrica entregue pelas empresas distribuidoras aos consumidores industriais sempre foi objecto de interesse e de normalização legislativa.

Normas europeias/nacionais

Norma EN 50160 qualidade da energia

Norma EN 61000-4-3 qualidade do equipamento de análise

Normas internacionais

Norma IEEE 519,

Norma IEC 61000

As normas internacionais relativas ao consumo de energia eléctrica, 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.

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 correntes consumidas eram também sinusoidais e da mesma frequência, podendo apenas encontrar-se desfasadas relativamente à tensão (Figura 1).

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.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

A Figura 2 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 micro-electrónicos 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.

As normas internacionais relativas ao consumo de energia eléctrica, ao impor limites de perturbação que os equipamentos introduzam na rede evidenciam a importância em resolver os problemas da poluição na rede eléctrica, quer para os novos equipamentos a serem produzidos, quer para os equipamentos já instalados [1-3].

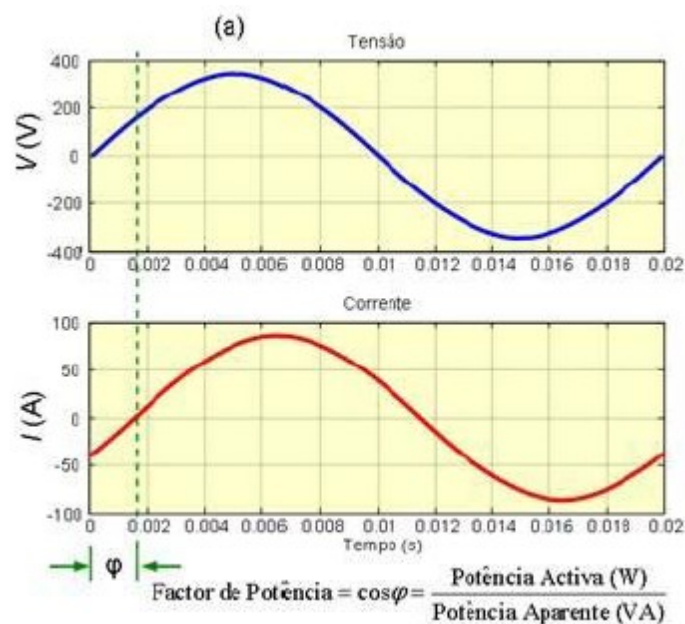


Figura 1 - Tensão e corrente num sistema eléctrico com cargas lineares.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

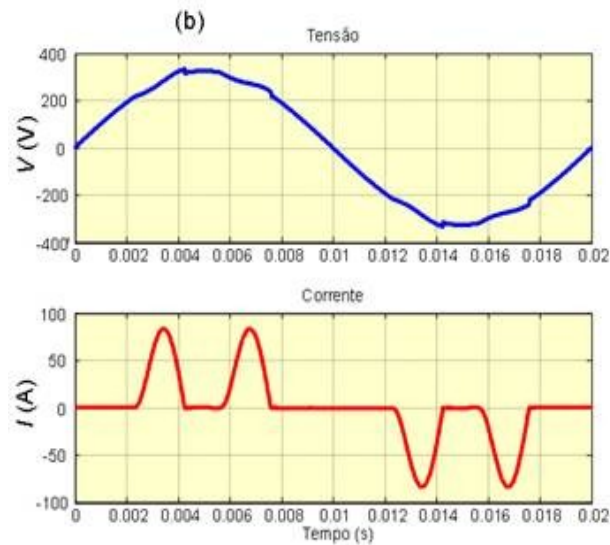


Figura 2 - Tensão e corrente num sistema eléctrico com uma carga não linear.

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 não é o tema deste tutorial uma vez que é o mais estudado e divulgado.

Os outros problemas que interferem com a qualidade da energia eléctrica são:

- Tensão fora dos limites normalizados
- Desequilíbrio de tensão entre fases ou incorrecta correcta sequência de fases
- Frequência fora dos limites normalizados
- Factor de potência baixo muito menor do que 1 (consumo de energia reactiva muito alto)
- Sobre-tensões momentâneas (voltage swell)
- Sub-tensões momentâneas (voltage sag)
- Interrupções ou cortes momentâneos
- Flutuações rápidas de tensão (voltage flicker)
- Micro-cortes
- Transitórios
- Ruído de alta frequências
- Distorção harmónica
- Inter-harmónicas

Os problemas da qualidade da energia eléctrica, como os descritos em detalhe a seguir e ilustrados nas figuras, além de levarem à operação incorrecta de alguns equipamentos, podem também danificá-los.

ANÁLISE DETALHADA

– Distorção harmónica:

Harmónicos são descritos pelo IEEE como tensões ou correntes sinusoidais com frequências que são múltiplos inteiros da frequência fundamental em que o sistema de alimentação é projectado para operar.

Isto significa que para um sistema de 50 Hz, as frequências harmónicas são 100 Hz (segundo harmónico), 150

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

Hz (3^a harmónica) e assim por diante. Eles combinam-se com a tensão fundamental produzindo ondas de uma forma não-sinusoidal, portanto, uma distorção de forma de onda ou seja um problema de qualidade de energia. A forma não-sinusoidal final corresponde à soma de ondas sinusoidais diferentes, com diferentes amplitudes e ângulos de fase, tendo frequências que são múltiplos da frequência do sistema.

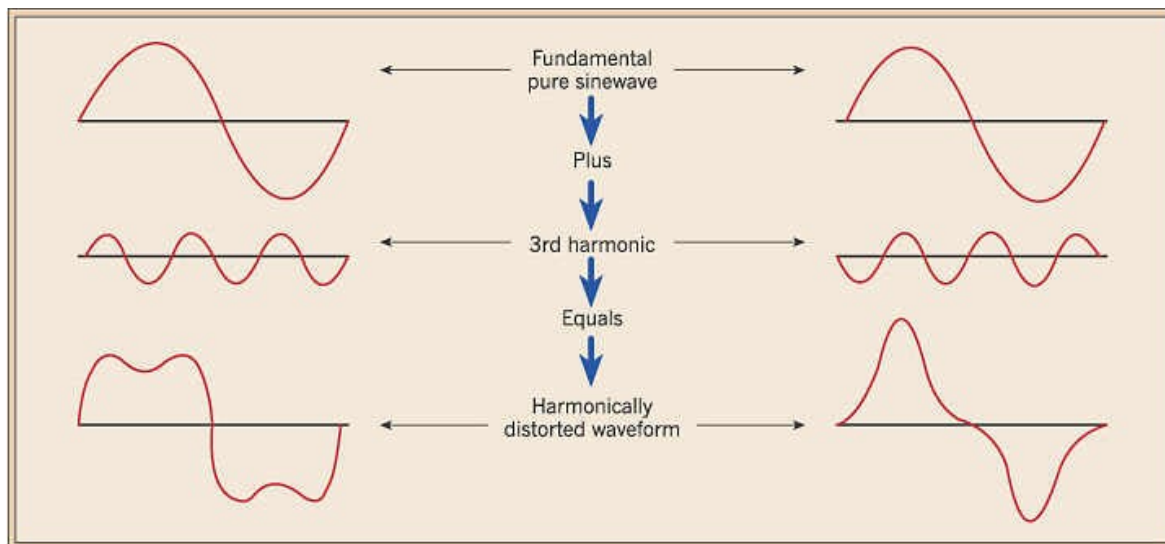


Figura 3 – Distorção Harmónica

O nível de distorção harmónica pode ser caracterizado pelo espectro completo das harmónicas dado pelas amplitudes e ângulos de fase de cada componente harmónica. Também é comum usar a distorção harmónica total (THD), como medida do valor eficaz de distorção harmónica. A distorção harmónica tornou-se uma preocupação crescente para muitos utilizadores finais e para a rede pública de energia devido ao uso crescente de equipamentos electrónicos. A protecção contra os altos níveis de harmónicas inclui isolamento ou modificação da fonte, a multiplicação de fase, modulador de largura de pulso (PWM) e aplicação de filtros de harmónicas passivos ou activos.

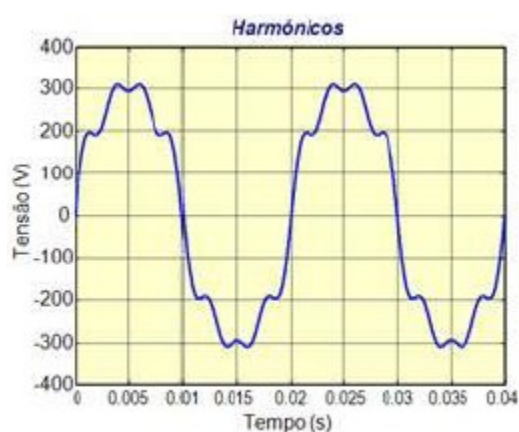


Figura 4 - Tensão com distorção harmónica.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

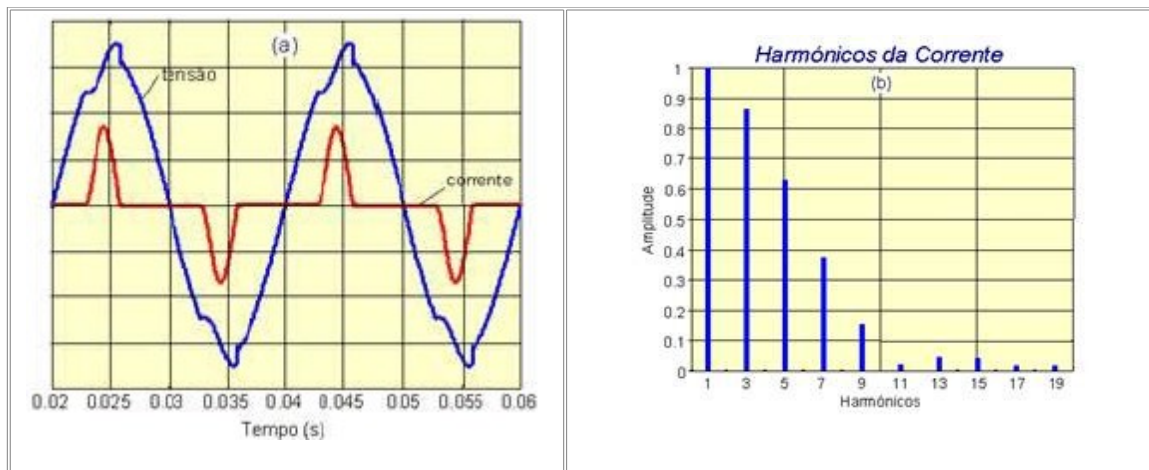


Figura 4 – Rectificador monofásico com filtro capacitivo: (a) formas de onda da tensão e da corrente de entrada; (b) harmónicos da corrente (valores normalizados)

ORIGENS DA “POLUIÇÃO” HARMÓNICA

Antes da proliferação de equipamentos electrónicos, dos quais os mais recentes são a introdução maciça de iluminação LED e economizadora, as harmónicas eram geralmente causadas por máquinas eléctricas que trabalhavam acima do joelho da curva de magnetização (saturação magnética), fornos de arco, máquinas de solda, rectificadores de potência, e motores CC de escova.

Na actualidade a principal causa deste fenómeno, que pode ser vista como um tipo de poluição do ambiente electromagnético são os equipamentos electrónicos de uso generalizado, ligados à rede eléctrica que se comportam como cargas não lineares.

Estes dispositivos podem ser estudados considerando-os como fontes de corrente que injectam correntes harmónicas na rede. Consequentemente, é criada uma distorção de tensão pois estas correntes produzem quedas de tensão não-lineares em toda a impedância da rede eléctrica.

Hoje, quase todas as cargas são não-lineares, tais como equipamentos de electrónica de potência, incluindo as fontes de alimentação comutada Switched Power Supplies (SMPS), Unidades de Alimentação Ininterrupta UPS, variadores de velocidade ajustável (ASD), iluminação de alta eficiência, equipamentos de informática, aparelhos de televisão, balastros electrónicos para lâmpadas de descarga, controladores electrónicos para uma enorme variedade de cargas industriais, etc.. Assim a maior parte dos problemas que surgem nos sistemas eléctricos tem origem na excessiva distorção das correntes ou tensões junto ao consumidor final.

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.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

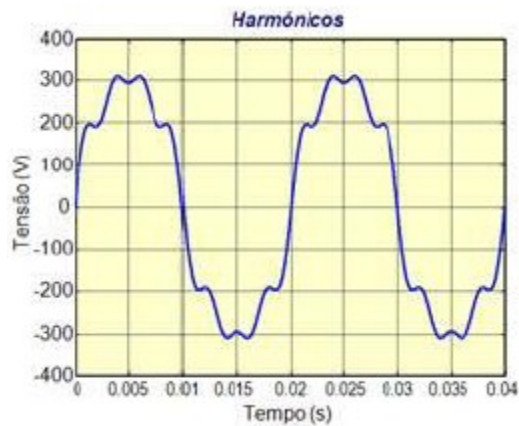


Figura 3 - Tensão com distorção harmónica.

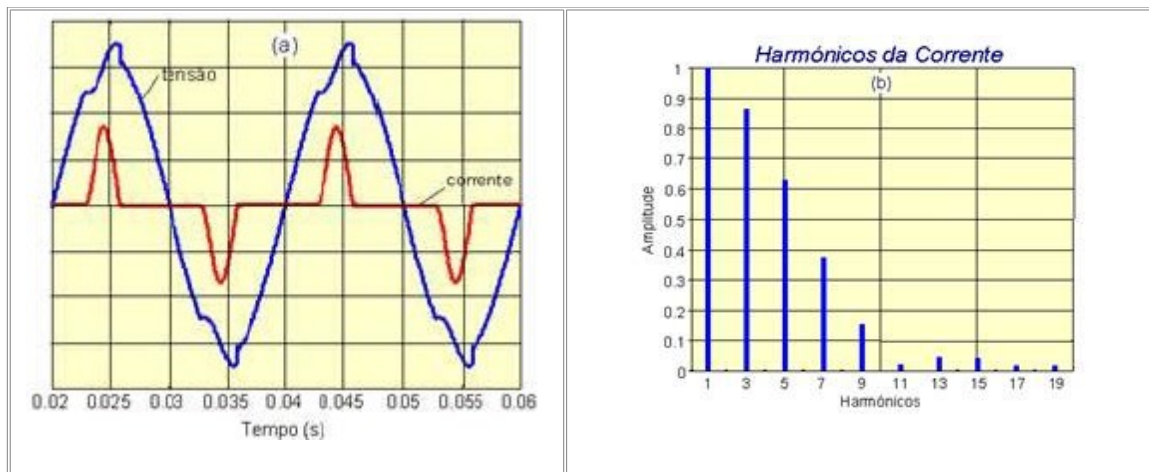


Figura 4 – Rectificador monofásico com filtro capacitivo: (a) formas de onda da tensão e da corrente de entrada; (b) harmónicos da corrente (valores normalizados)

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.

Estudo de equipamentos causadores de distorção harmónica

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

Serão apresentados a seguir equipamentos e fenómenos que produzem poluição harmónica na rede eléctrica. Quando se fizer referência ao termo ideal, significa que não se desconsideram os efeitos indutivos do sistema de alimentação, ou seja, considera-se a alimentação feita a partir de uma fonte ideal.

Conversores

Serão vistos aqui alguns casos típicos de componentes harmónicas produzidas por conversores electrónicos de potência, tais como rectificadores e controladores de potência CA (tiristores, triacs e GTO).

Formas de onda em conversores ideais

A figura 4.7 mostra um rectificador a díodos alimentando uma carga do tipo RL, ou seja, que tende a consumir uma corrente constante, caso sua constante de tempo seja muito maior do que o período da rede.

Na figuras 4.8 tem-se a forma de tensão de saída do rectificador, numa situação ideal. Supondo uma corrente constante, sem ondulação sendo consumida pela carga, a forma de onda da corrente na entrada do rectificador é mostrada na figura 4.9.

As amplitudes das componentes harmónicas deste sinal seguem a equação (4.1)

$$(4.1) \quad I_h = \frac{1}{h} \\ h = k \cdot q \pm 1$$

onde:

h é a ordem harmónica;

k é qualquer inteiro positivo;

q é o número de pulsos do circuito rectificador (6, no exemplo).

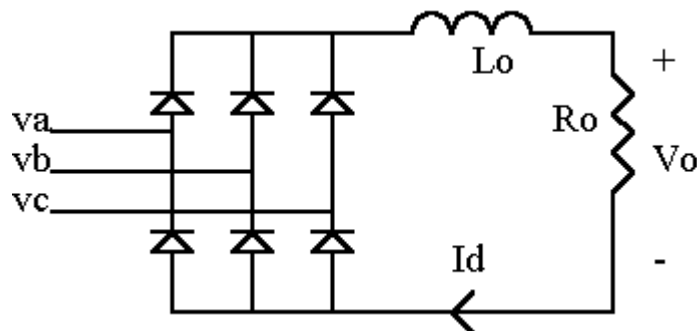


Figura 4.7 Circuito rectificador trifásico, com carga RL.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

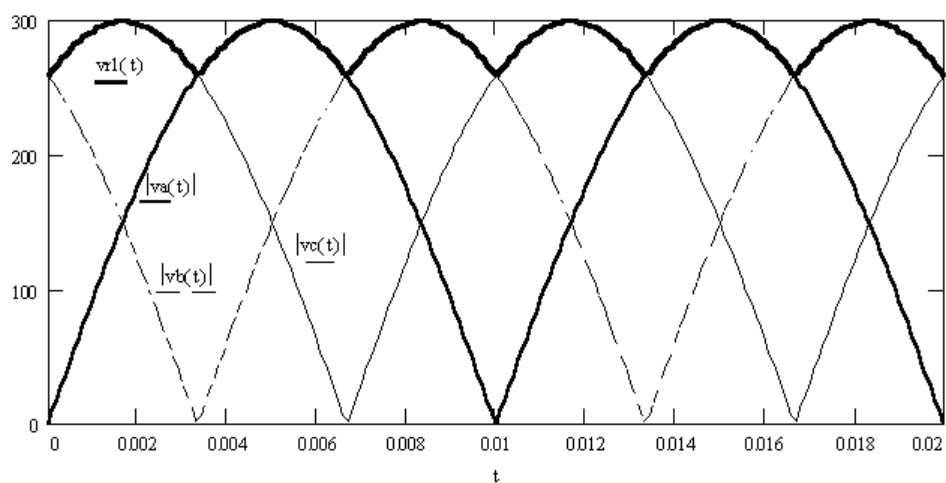
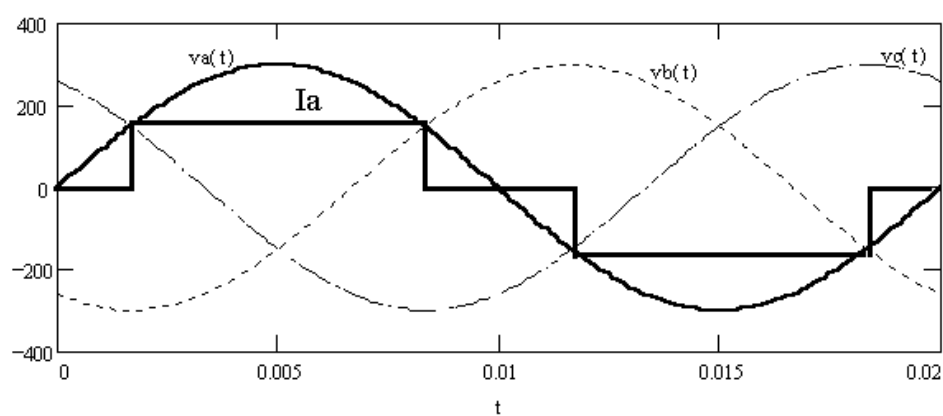


Figura 4.8 Tensão de saída de rectificador ideal.



a)

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

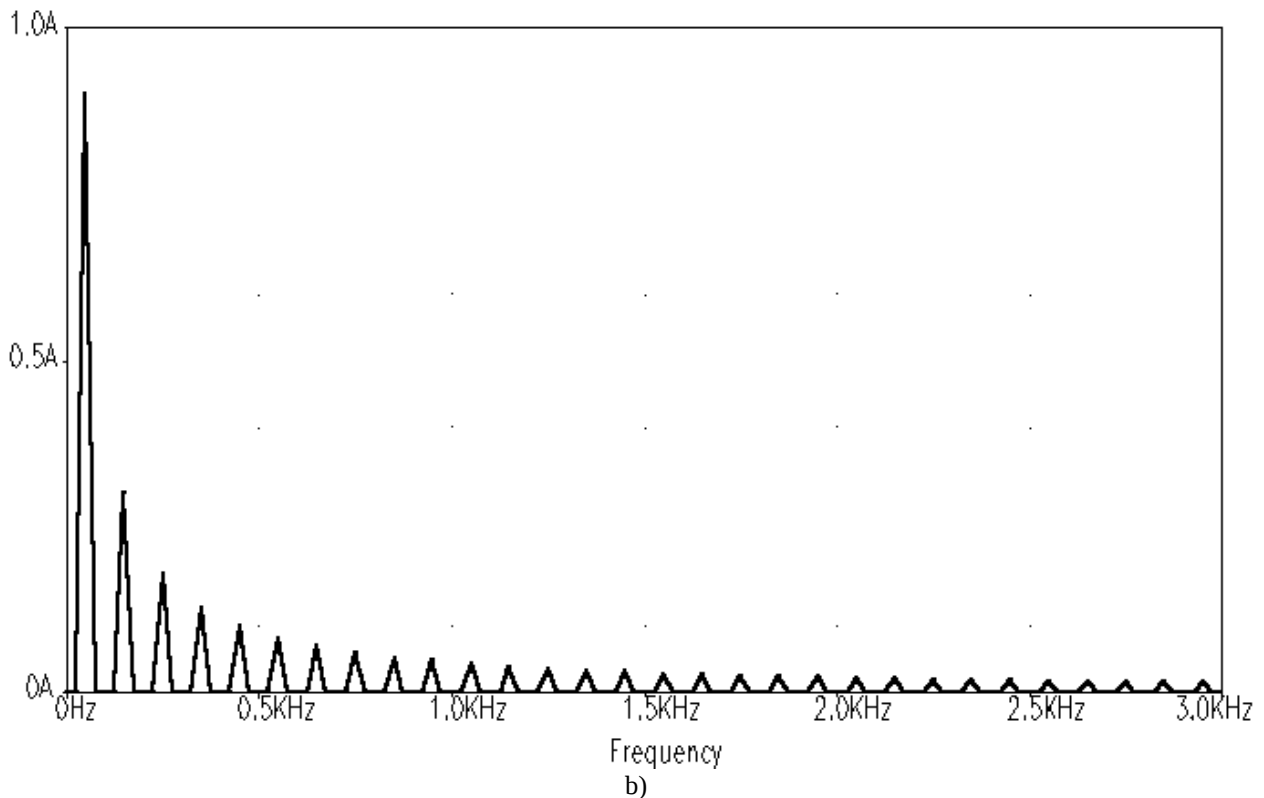
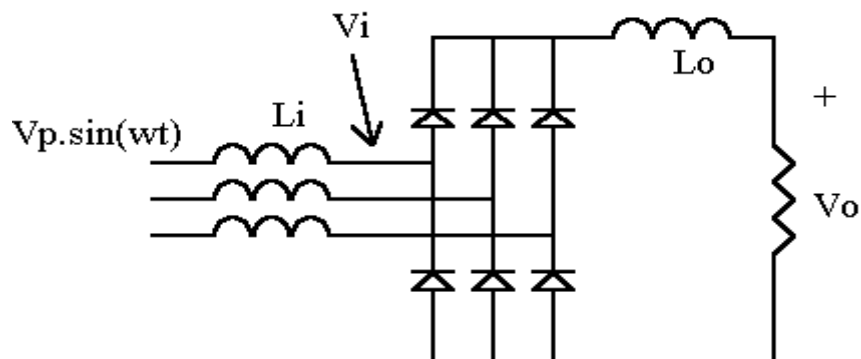


Figura 4.9 Tensões e corrente de entrada com carga indutiva ideal e espectro da corrente.

A comutação

Uma forma de corrente rectangular como a suposta na figura 4.9 pressupõe a não existência de indutâncias em seu caminho, ou então uma fonte de tensão infinita, que garante a presença de tensão qualquer que seja a derivada da corrente.

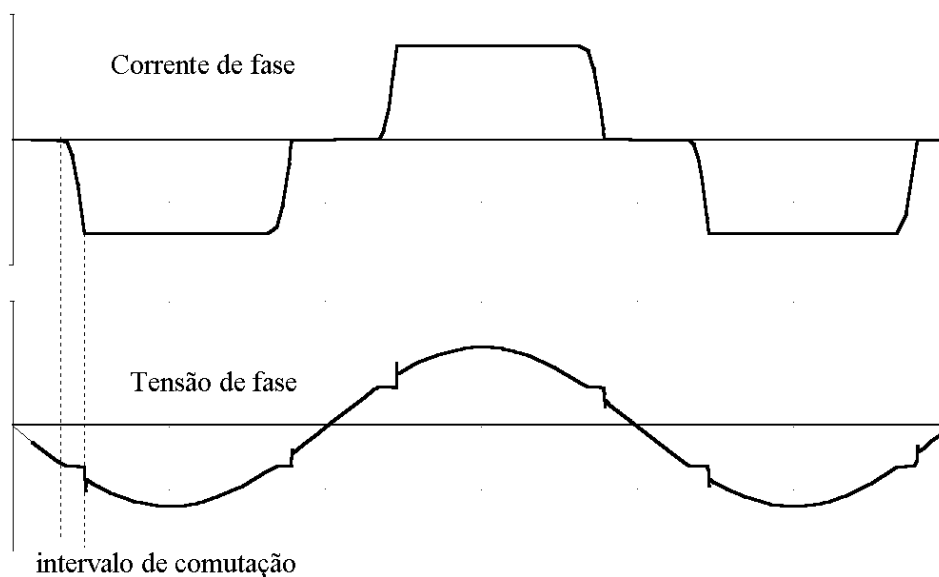
Na presença de indutâncias, como mostrado na figura 4.10, no entanto, a transferência de corrente de uma fase para outra não pode ser instantânea. Ao invés disso, existe um intervalo no qual estarão em condução o diodo que está entrando e aquele que está em processo de desligamento. Isto configura um curto-circuito na entrada do rectificador. A duração deste curto-circuito depende da rapidez do crescimento da corrente pela fase que está entrando em condução, ou seja, da diferença de tensão entre as fases que estão envolvidas na comutação.



a)

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE



b)

Figura 4.10 Topologia de rectificador trifásico, não-controlado, com carga indutiva . Formas de onda típicas, indicando o fenómeno da comutação.

A figura 4.11 mostra um resultado experimental relativo a um rectificador deste tipo. Neste caso a corrente não é plana, mas apresenta uma ondulação determinada pelo filtro indutivo do lado CC. Mesmo neste caso pode-se notar que as transições da corrente de entrada não são instantâneas e que durante as transições, nota-se uma perturbação na tensão na entrada do rectificador. O valor instantâneo desta tensão é a média das tensões das fases que estão comutando, supondo iguais as indutâncias da linha.

Esta queda da tensão é designada por "notching".

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

Como se nota, a distorção na tensão ocorre devido à distorção na corrente associada à reactância da linha.

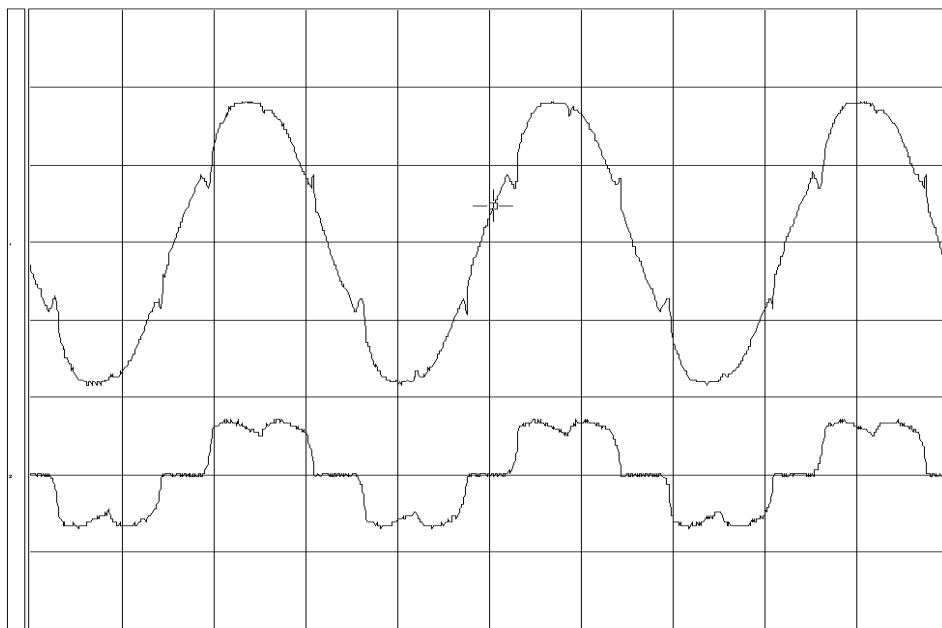


Figura 4.11 Distorção na tensão devido ao fenómeno de comutação.

Reactor controlado a tiristores (RCT)

A figura 4.12 mostra o circuito de um RCT, elemento utilizado para fazer controle de tensão no sistema eléctrico. Isto é feito pela síntese de uma reactância equivalente, que varia entre 0 e L , em função do intervalo de condução do par de tiristores. A forma de onda da corrente, bem como seu espectro estão mostrados na figura 4.13. Observe a presença de harmónicos ímpares. À medida que o intervalo de condução se reduz aumenta a THD da corrente.

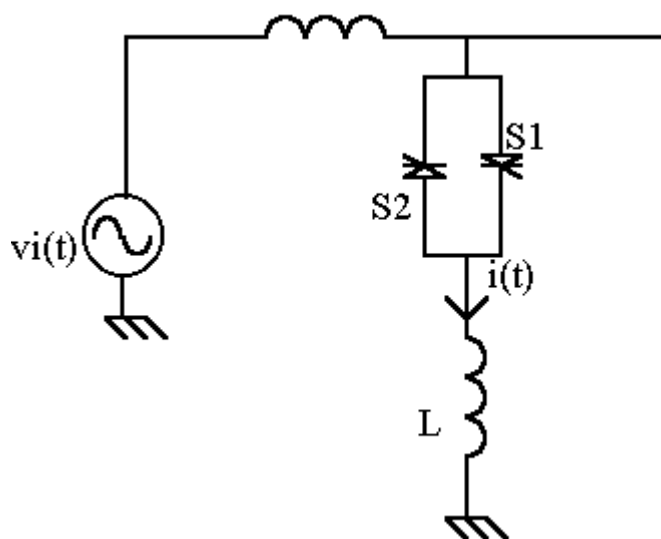


Figura 4.12 Diagrama eléctrico de RCT.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

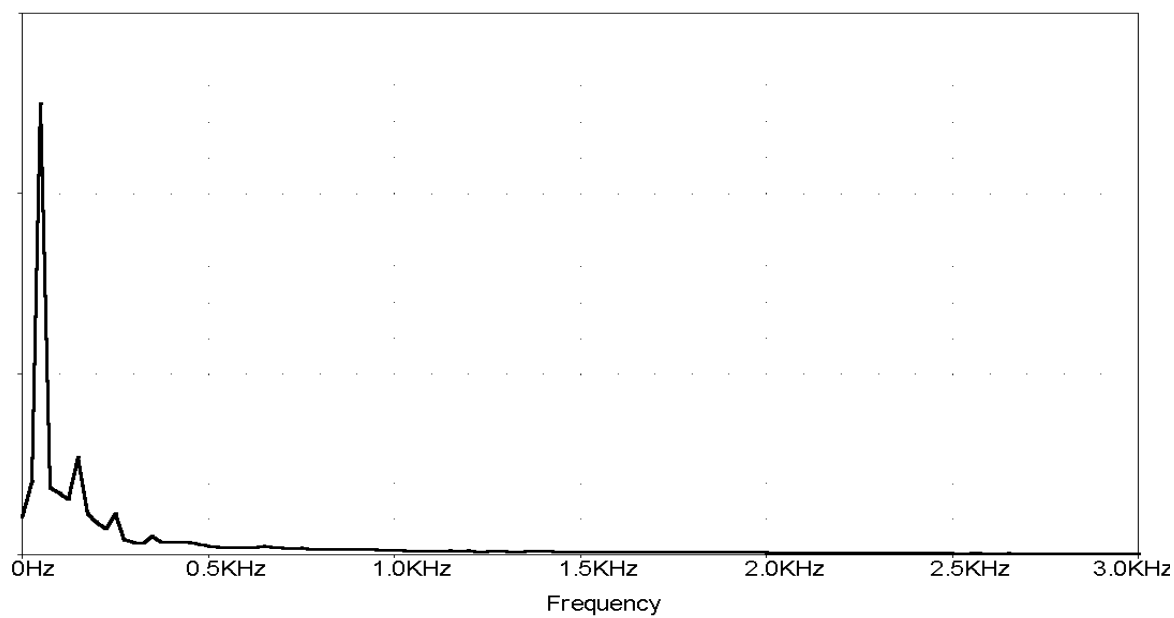
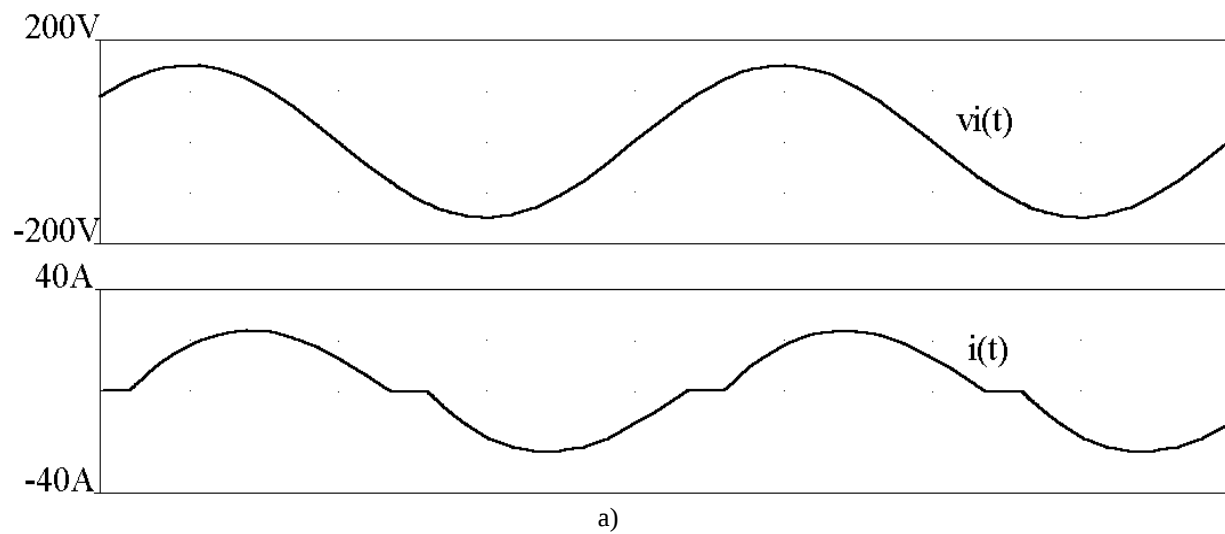


Figura 4.13 Formas de onda e espectro da corrente em RCT.

A corrente obedece à seguinte expressão:

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

$$i(t) = \frac{V_i}{\omega L} \cdot [\cos(\alpha) - \cos(\omega t)]$$

(4.2)

α é o ângulo de disparo do SCR, medido a partir do cruzamento da tensão com o zero. V_i é o valor de pico da tensão.

As componentes harmónicas (valor eficaz) são dadas pela equação (4.3), existindo para todas as componentes ímpares. A figura 4.14 mostra o comportamento de algumas harmónicas em função do ângulo α . Note que a terceira componente pode atingir quase 14% do valor da fundamental.

$$I_h = \frac{4}{\pi} \frac{V_i}{\sqrt{2}\omega L} \left[\frac{\sin((h+1)\cdot\alpha)}{2(h+1)} + \frac{\sin((h-1)\cdot\alpha)}{2(h-1)} - \cos(\alpha) \cdot \frac{\sin(h\cdot\alpha)}{h} \right]$$

(4.3)

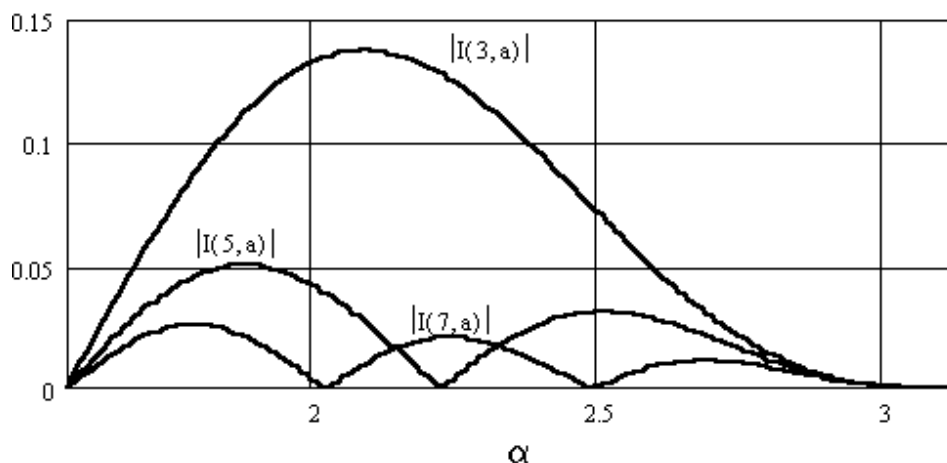


Figura 4.14 Variação do valor eficaz de cada componente harmónica em relação à fundamental.

Forno de arco

As harmónicas produzidas por um forno de arco, usado na produção de aço, são imprevisíveis devida à variação aleatória do arco. A corrente do arco é não-periódica e sua análise revela um espectro contínuo, incluindo harmónicas de ordem inteira e fracionária. Entretanto, medições indicam que harmónicas inteiras entre a 2ª e a 7ª predominam sobre as demais, sendo que sua amplitude decai com a ordem.

Quando o forno actua no refinamento do material, a forma de onda se torna simétrica, desaparecendo as harmónicas pares. Na fase de fusão, tipicamente, as componentes harmónicas apresentam amplitude de até 8% da fundamental, enquanto no refino valores típicos são em torno de 2%.

Rectificadores com filtro capacitivo

Conforme já foi visto, a grande parte dos equipamentos electrónicos possuem um estágio de entrada constituído por um rectificador monofásico com filtro capacitivo. este tipo de circuito produz na rede correntes de forma impulsiva, centrados aproximadamente no pico da onda sinusoidal. O circuito está mostrado na figura 4.15. Na figura 4.16 tem-se formas de onda da tensão e da corrente, obtidas por simulação, bem como o espectro da corrente. Nota-se a grande amplitude das harmónicas, produzindo, certamente, uma elevada THD.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

Situação semelhante ocorre com entrada trifásica, quando são observados 2 impulsos de corrente em cada semi-ciclo, como mostra a figura 4.17. Nota-se, mais uma vez, a significativa distorção que pode ocorrer na forma da tensão devido à queda de tensão que ocorre na reactância da linha.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

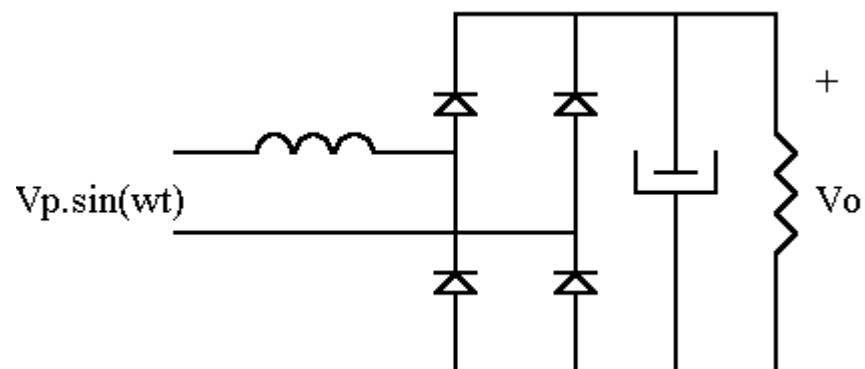
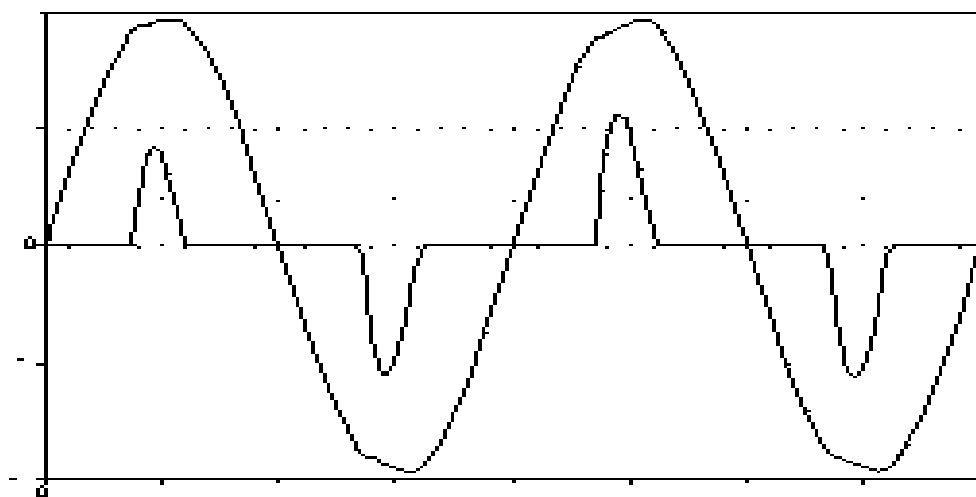
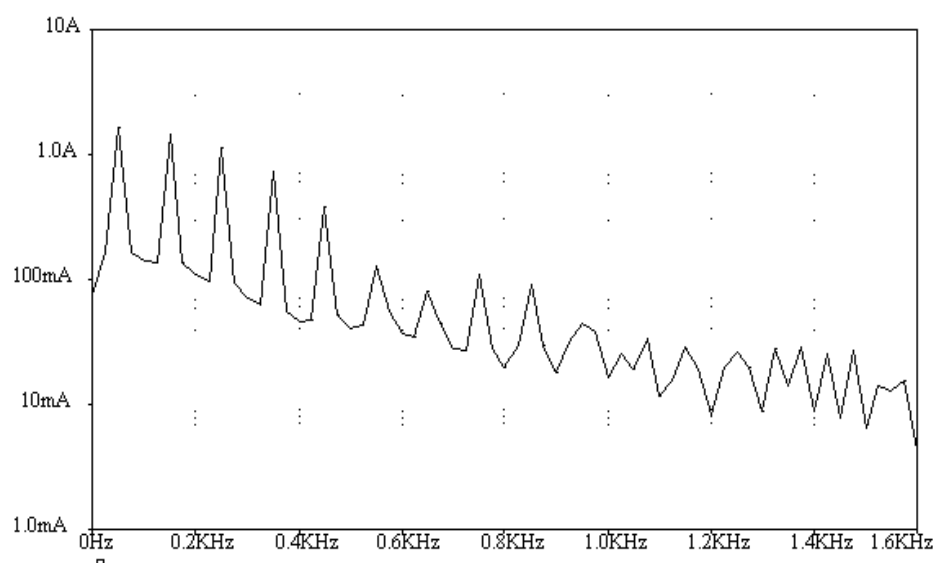


Figura 4.15 rectificador monofásico com filtro capacitivo.



(a)



FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

(b)

Figura 4.16 (a) Corrente de entrada e tensão de alimentação de rectificador alimentando filtro capacitivo. (b) Espectro da corrente.

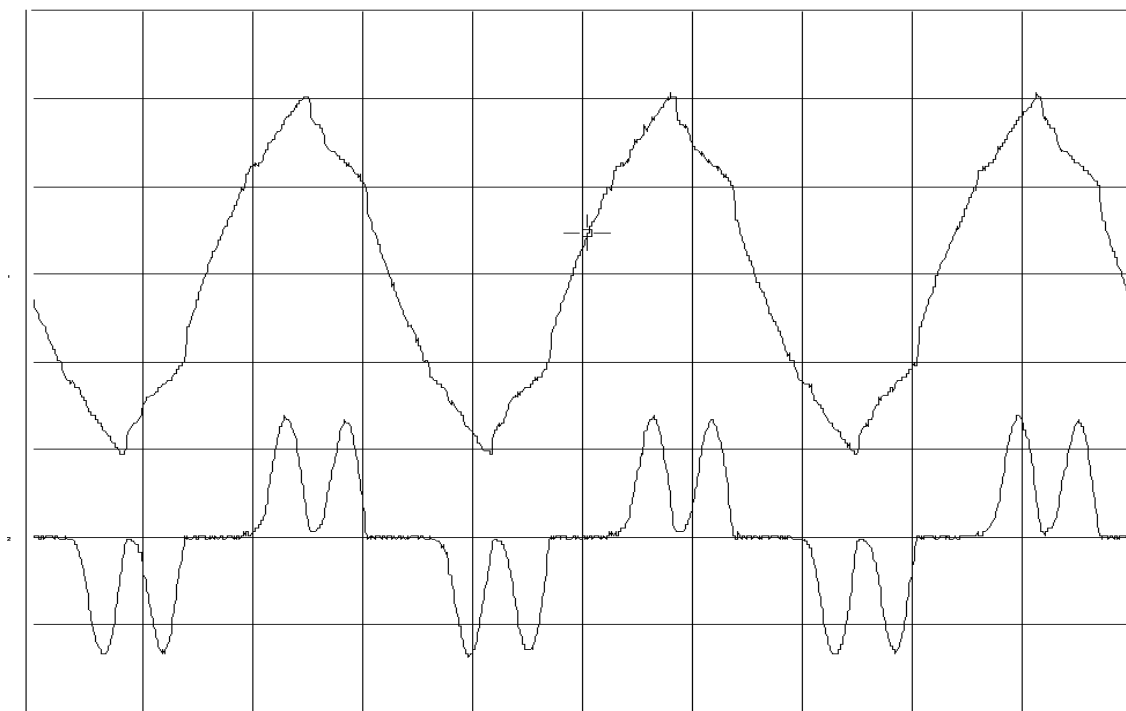


Figura 4.17 Tensão na entrada (superior) e corrente de linha (inferior) em rectificador trifásico com filtro capacitivo.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

CONSEQUÊNCIAS 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 :

- Aumentos das perdas e sobre-aquecimento significativo dos condutores eléctricos em especial sobrecarga de neutro em sistemas trifásicos equilibrados devido ao facto de que os harmónicos de ordem ímpar da 3 fases produzem no neutro uma corrente de soma em vez de se anularem como a componente da frequência fundamental
- Interferência electromagnética com sistemas de telecomunicações e transmissão de dados por cabos de pares de cobre.
- Maior probabilidade de ocorrência de ressonância nos circuitos com formação de ondas estacionárias com picos de amplitude elevadíssimos e nulos de tensão.
- Aumento das perdas (aquecimento), saturação, ressonâncias, vibrações nos enrolamentos e redução da vida útil de transformadores;
- Aquecimento, binários pulsantes, ruído audível perda de eficiência 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 com incomodativos disparos de “protecção térmica”;
- Aumento considerável na dissipação térmica dos condensadores, levando à deterioração o dieléctrico;
- Redução da vida útil das lâmpadas e flutuação da intensidade luminosa (“flicker” – para o caso de ocorrência de sub-harmónicos) e rupturas de isolamento por sobretensão em caso de ressonâncias;
- erros nos medidores de energia eléctrica e outros instrumentos de medida em especial se forem do tipo digital e não forem “True RMS” ;
- 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 micro-controladores, etc. (cabe lembrar que estes equipamentos controlam frequentemente processos de fabrico).

TDD - Total Demand Distortion

O nível de distorção da corrente pode ser caracterizado pela distorção harmónica total, embora às vezes isso possa ser enganador. Por exemplo, muitos ASDs irá exibir valores altos THD para a corrente de entrada quando operam com cargas muito leves. No entanto, isso não é alarmante, porque a magnitude da corrente harmónica é baixa, apesar de sua distorção relativa é alta.

Como resultado, o IEEE (Std 519) define a Total Distortion Demand (TDD), a fim de

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

tipificar correntes harmónicas de uma forma consistente. O THD (TDD) é o mesmo que a distorção harmónica total, excepto que a distorção é expresso como uma percentagem de cerca de carga da corrente nominal, e não como uma percentagem da magnitude fundamentais corrente no instante da medição.

Sinopse:

Magnitude: 0 a 20% (típica)

Conteúdo espectral: 0 a 100 harmónica

Duração: de estado estacionário

Origem: Dispositivos não-linear (isto é, Electrónica de Potência)

Sintomas: Mau funcionamento e sobre-aquecimento

Ocorrência: baixa a média

Protecção: filtros de harmónicas, K-Factor Transformadores

Efeitos de tensões (ou correntes) harmónicas em equipamentos eléctricos comuns.

A intensidade admissível das harmónicas na rede eléctrica de uma instalação depende da susceptibilidade dos equipamentos consumidores (ou da fonte de alimentação por exm o transformador de potência de um PT).

Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que exigem uma alimentação sinusoidal como, por exemplo, equipamentos de telecomunicações e processamento de dados ou outros electrónicos de missão crítica. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmónicas (de tensão ou de corrente) pode ser prejudicial, produzindo maiores esforços nos componentes e nos isolamentos.

Motores e geradores

O maior efeito dos harmónicos em máquinas eléctricas rotativas (indução e síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre. Afecta-se, assim, sua eficiência e o binário disponível. Além disso, tem-se um possível aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação sinusoidal.

Outro fenómeno é a presença de harmónicos no fluxo magnético, produzindo alterações no funcionamento motor, como componentes de binário que actuam no sentido oposto ao do campo girante produzido pela componente fundamental, como ocorre com o 5º, 11º, 17º, etc. harmónicos. Isto significa que tanto o quinto componente, quanto o sétimo induzem uma sexta harmónica no rotor. O mesmo ocorre com outros pares de componentes. Isto leva ao aparecimento de binários pulsantes

O sobre-aquecimento que pode ser tolerado depende do tipo de rotor utilizado. Os rotores bobinados são mais seriamente afectados do que os de rotor em curto circuito tipo gaiola de esquilo. Os de gaiola de esquilo profunda, por causa do efeito pelicular, que conduz a condução da corrente para a superfície do condutor nas frequências mais elevadas, sofrem maior aquecimento do que os de gaiola de esquilo convencional.

O efeito cumulativo do aumento das perdas reflecte-se numa diminuição da eficiência e da vida útil da máquina. A redução na eficiência é indicada na literatura como de 5 a 10% dos valores obtidos com uma alimentação sinusoidal. Este facto não se aplica a máquinas projectadas para serem alimentadas por inversores, mas apenas àquelas de uso em alimentação directa da rede.

Algumas componentes harmónicas, ou pares de componentes (por exemplo, 5ª e 7ª, produzem uma resultante de menor frequência de 6ª harmónica) podem estimular oscilações mecânicas (binários pulsantes) em sistemas turbina-gerador ou motor-carga, devido a uma potencial excitação de ressonâncias mecânicas. Isto pode levar a problemas em processos industriais como, por exemplo, na produção de fios, em que a precisão no funcionamento é elemento fundamental para a qualidade do produto.

Transformadores

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

Neste caso há também um aumento nas perdas. Harmónicos na tensão aumentam as perdas no ferro do núcleo, enquanto harmónicos na corrente elevam as perdas no cobre dos enrolamentos. A elevação das perdas no cobre deve-se principalmente ao efeito pelicular, que implica numa redução da área efectivamente condutora à medida que se eleva a frequência da corrente.

Normalmente as componentes harmónicas possuem amplitude reduzida, o que faz com que esses aumentos de perdas não sejam excessivos. No entanto, podem surgir situações específicas (ressonâncias, por exemplo) em que surjam componentes de alta frequência e amplitude elevada.

Além disso o efeito das reactâncias de dispersão fica ampliado, uma vez que seu valor aumenta com a frequência.

Associada à dispersão existe ainda outro factor de perdas que se refere às correntes induzidas pelo fluxo disperso. Esta corrente manifesta-se nos enrolamentos, no núcleo, e nas peças metálicas adjacentes aos enrolamentos. Estas perdas crescem proporcionalmente ao quadrado da frequência e da corrente.

Existe ainda uma maior influência das capacidades parasitas (entre espiras e entre enrolamento) que podem realizar acoplamentos não desejados e, eventualmente, produzir ressonâncias no próprio dispositivo.

Cabos de alimentação

Por causa do efeito pelicular, que restringe a secção condutora para componentes de frequência elevada, também os cabos de alimentação têm um aumento de perdas devido às harmónicas de corrente, pois a sua impedância efectiva aumenta muito com a frequência da corrente. Além disso tem-se o chamado "efeito de proximidade", o qual relaciona um aumento na resistência do condutor em função do efeito dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados nas adjacências.

A figura 4.1 mostra curvas que indicam a secção transversal e o diâmetro de condutores de cobre que devem ser utilizados para que o efeito pelicular não seja significativo (aumento menor que 1% na resistência). Note que para 3kHz o máximo diâmetro aconselhável é aproximadamente 1 ordem de grandeza menor do que para 50Hz. Ou seja, para frequências acima de 3 kHz um condutor com diâmetro maior do que 2,5 mm já começa a ser significativo em termos de efeito pelicular.

Além disso, caso os cabos sejam longos e os sistemas conectados tenham suas ressonâncias excitadas pelas componentes harmónicas, podem aparecer ondas estacionárias que provocam elevadas sobre-tensões ao longo da linha, podendo danificar o cabo.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

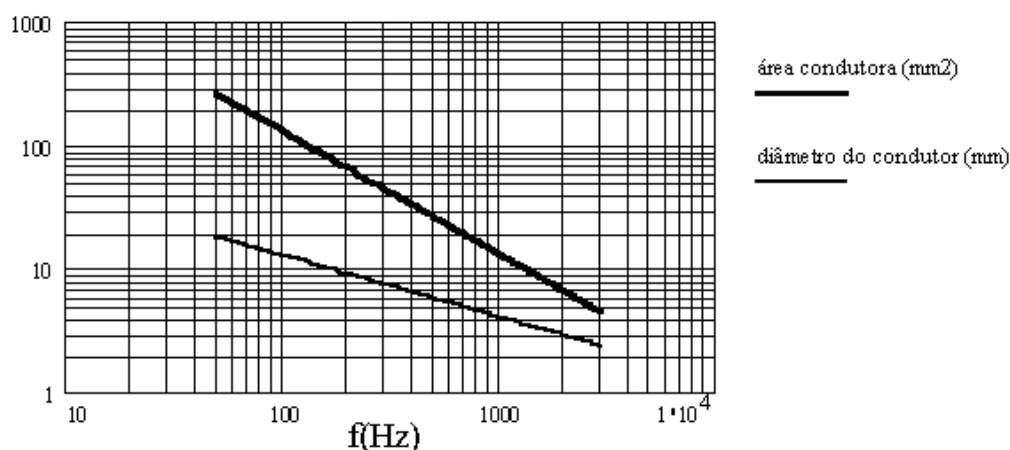


Figura 4.1 Área de secção e diâmetro de fio de cobre que deve ser usado em função da frequência da corrente para que o aumento da resistência seja menor que 1%.

Na figura 4.2 tem-se a resposta em frequência, para uma entrada em tensão, de um cabo de 10 km de comprimento, com parâmetros obtidos de um cabo trifásico 2 AWG, 6 kV. As curvas mostram o módulo da tensão no final do cabo, ou seja, sobre a carga (do tipo RL). Dada a característica indutiva da carga, esta comporta-se praticamente como um circuito aberto em frequências elevadas. Quando o comprimento do cabo for igual a $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda do sinal injectado, este "circuito aberto" no final da linha reflecte-se como um curto-circuito na fonte. Isto repete-se para todos os múltiplos ímpares desta frequência. As duas curvas mostradas referem-se à resposta em frequência sem e com o efeito pelicular. Nota-se que considerando este efeito tem-se uma redução na amplitude das ressonâncias, devido ao maior amortecimento apresentado pelo cabo por causa do aumento de sua resistência.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

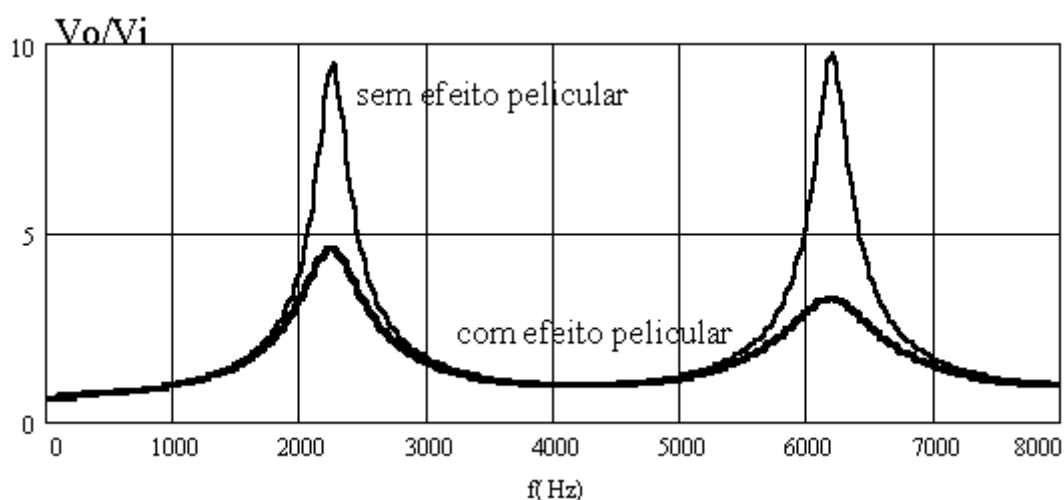


Figura 4.2 Resposta em frequência de cabo trifásico (10 km).

Na figura 4.3 tem-se a perfil do módulo da tensão ao longo do cabo quando o sinal de entrada apresentar-se na primeira frequência de ressonância. Observe que a sobre-tensão na carga atinge quase 4 vezes a tensão de entrada (já considerando a acção do efeito pelicular). O valor máximo não ocorre exactamente sobre a carga porque ela não é, efectivamente, um circuito aberto nesta frequência de aproximadamente 2,3 kHz.

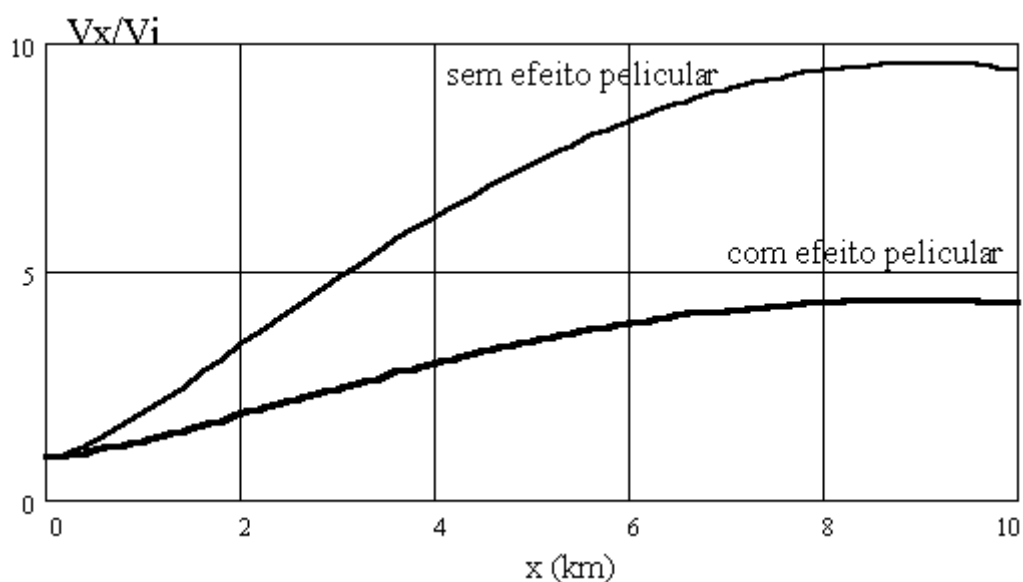


Figura 4.3

Perfil de tensão ao longo do cabo na frequência de ressonância.

Na figura 4.4 tem-se a resposta no tempo de uma linha de 40 km (não incluindo o efeito pelicular), para uma entrada sinusoidal (50Hz), na qual existe uma componente de 1% da harmónica que coincide com a frequência de ressonância do sistema (11ª). Observe como esta componente aparece amplificada sobre a carga.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

À medida que aumenta o comprimento do cabo a ressonância se dá em frequência mais baixa, aumentando a possibilidade de amplificar os harmónicos mais comuns do sistema.

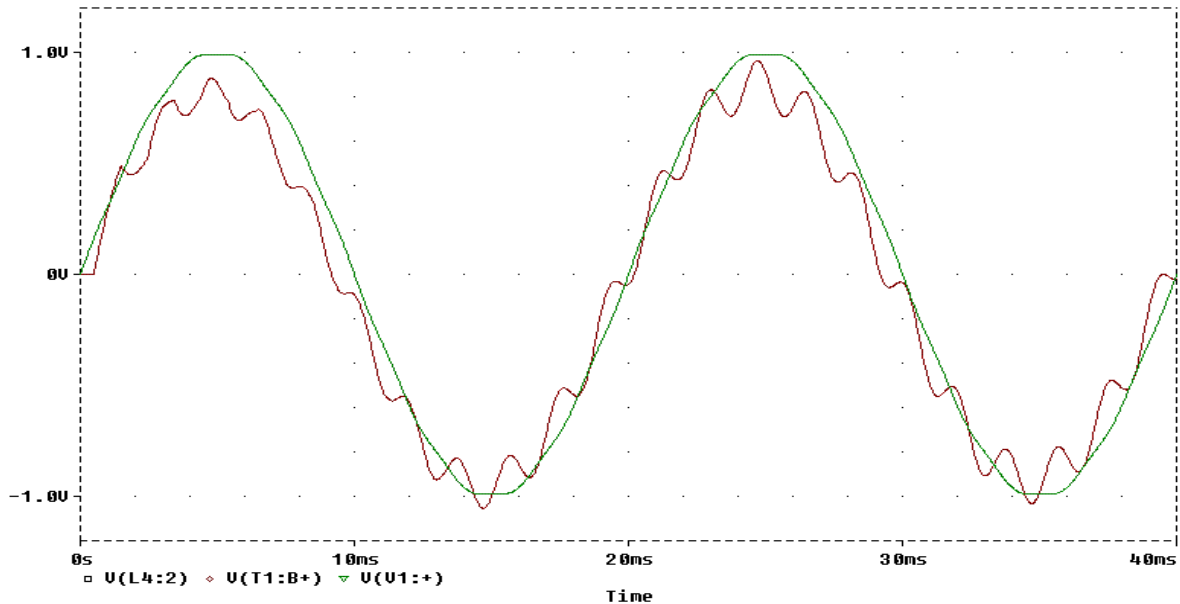


Figura 4.4 Resposta no tempo de cabo de transmissão a uma entrada com componente na frequência de ressonância.

Condensadores

O maior problema aqui é a possibilidade de ocorrência de ressonâncias (excitadas pelas harmónicas), podendo produzir níveis excessivos de corrente e/ou de tensão. Além disso, como a reactância capacitiva diminui com a frequência, tem-se um aumento nas correntes relativas às harmónicas presentes na tensão.

As correntes de alta frequência, que encontrarão um caminho de menor impedância pelos condensadores, elevarão as suas perdas resistivas. O decorrente aumento no aquecimento do dispositivo encurta a vida útil do condensador.

A figura 4.5 mostra um exemplo de correcção do factor de potência de uma carga e que leva à ocorrência de ressonância no sistema. Na figura 4.6 são mostradas as figuras relativas à tensão e às correntes da fonte nos diferentes circuitos.

Considere o circuito (a), no qual é alimentada uma carga do tipo RL, apresentando um baixo factor de potência. No circuito (b), é inserido um condensador que corrige o factor de potência, como se observa pela forma da corrente mostrada na figura 4.6 (intermediária). Suponhamos que o sistema de alimentação possua uma reactância indutiva, a qual interage com o condensador e produz uma ressonância série (que conduz a um curto-circuito na frequência de ressonância). Caso a tensão de alimentação possua uma componente nesta frequência, esta harmónica será amplificada. Isto é observado na figura 4.6 (inferior), considerando a presença de uma componente de tensão de 5^a harmónica, com 3% de amplitude. Observe a notável amplificação na corrente, o que poderia produzir importantes efeitos sobre o sistema.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

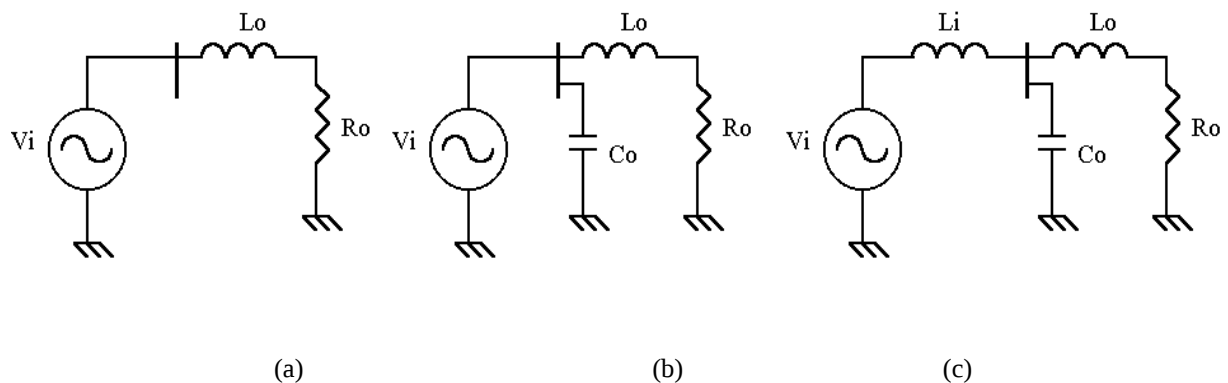


Figura 4.5 Circuitos equivalentes para análise de ressonância da linha com condensador de correcção do factor de potência.

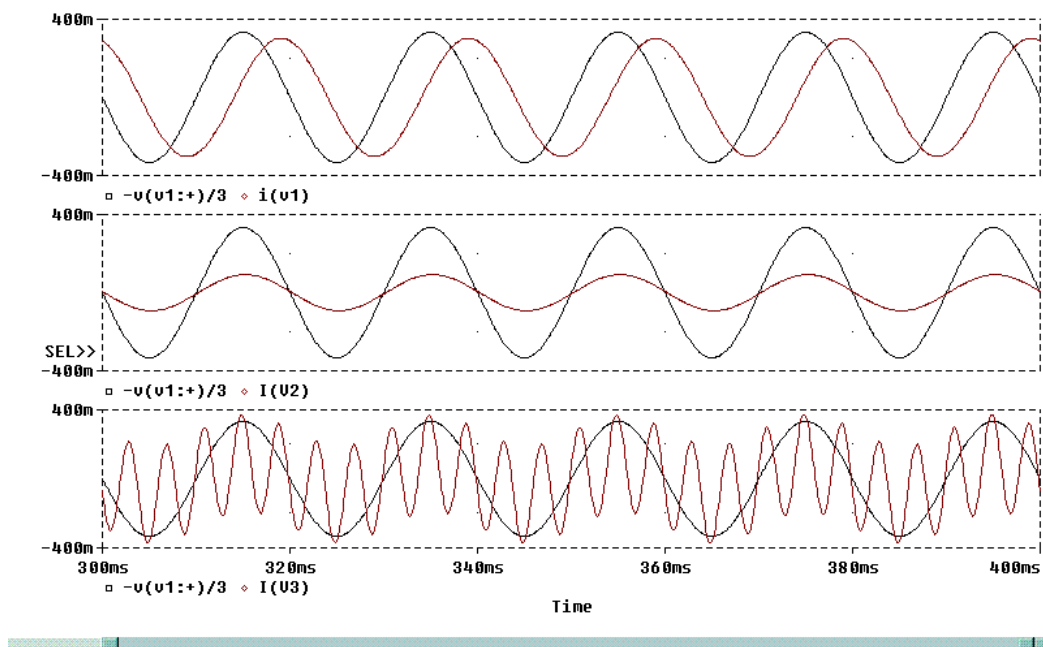


Figura 4.6 Formas de onda relativas aos circuitos da figura 4.5: (a) - superior; (b) - intermediário; (c) – inferior.

Equipamentos electrónicos

Alguns equipamentos podem ser muito sensíveis a distorções na forma de onda de tensão. Por exemplo, se um aparelho utiliza o cruzamento com o zero (ou outros aspectos da onda de tensão) para realizar alguma acção, as distorções na forma de onda podem alterar, ou mesmo inviabilizar, seu funcionamento, pois o zero de tensão resultante da soma das tensões de todas as harmónicas mais a fundamental deixa de ser coincidente com o zero da componente fundamental ou 1ª Harmónica.

Caso as harmónicas penetrem na alimentação do equipamento por meio de acoplamentos indutivos e capacitivos (que se tornam mais efectivos com a aumento da frequência), eles podem também alterar o bom funcionamento do aparelho.

Por isso actualmente é absolutamente necessário “blindar” ou dessensibilizar (por intermédio de filtros e correcta inserção dos componentes no circuito impresso.) os equipamentos electrónicos que vão trabalhar alimentados por redes com elevada poluição harmónica.

Aparelhos de medição

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

Os aparelhos de medição e instrumentação em geral são afectados por harmónicas, especialmente se ocorrerem ressonâncias que afectam a grandeza a medir.

Os dispositivos com discos de indução, (ou mesmo TI – transformadores de intensidade) como os medidores de energia, são sensíveis a componentes harmónicas, podendo apresentar erros positivos ou negativos, dependendo do tipo de medidor e da harmónica presente. Em geral a distorção deve ser elevada ($>20\%$) para produzir erro significativo.

Relés de protecção e fusíveis

Um aumento da corrente eficaz devida a harmónicas sempre provocará um maior aquecimento dos dispositivos pelos quais circula a corrente, podendo ocasionar uma redução em sua vida útil e, eventualmente, sua operação inadequada.

Em termos dos relés de protecção não é possível definir completamente as respostas devido à variedade de distorções possíveis e aos diferentes tipos de dispositivos existentes.

A referência [4.2] é um estudo no qual se afirma que os relés de protecção geralmente não respondem a qualquer parâmetro identificável, tais como valores eficazes da grandeza de interesse ou a amplitude de sua componente fundamental. O desempenho de um relé considerando uma faixa de frequências de entrada não é uma indicação de como aquele componente responderá a uma onda distorcida contendo aquelas mesmas componentes espectrais. Relés com múltiplas entradas são ainda mais imprevisíveis.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

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 sobre-dimensionados, 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.

– Ruído (interferência electromagnética): corresponde ao ruído electromagnético de alta frequência, que pode, por exemplo, ser produzido pelas comutações rápidas dos conversores electrónicos de potência.

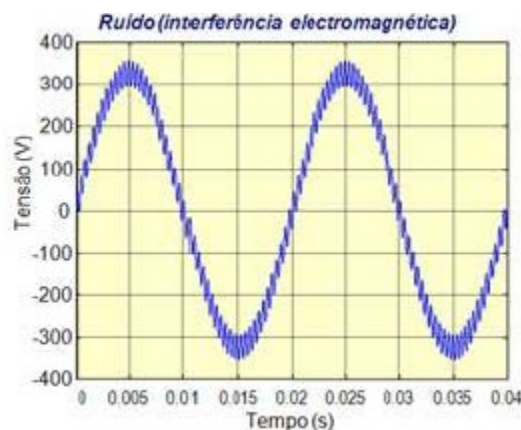


Figura 4 - Tensão com ruído de alta frequência.

– 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 ciclo-conversores (equipamentos que, alimentados a 50 Hz, permitem sintetizar tensões e correntes de saída com uma frequência inferior).

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

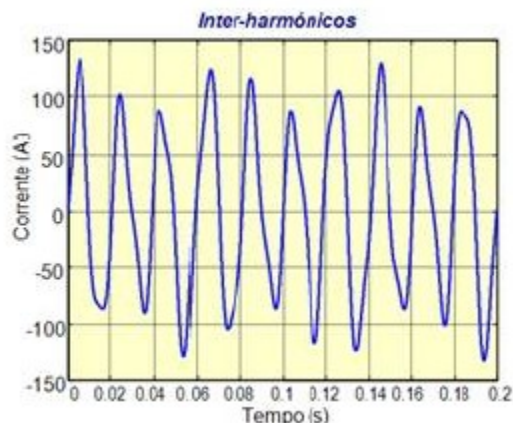


Figura 5 - Corrente com Inter-harmónicos.

– Interrupções :

As Interrupções são classificadas pela IEEE 1159 como uma diminuição de tensão de duração curta ou de longa duração.

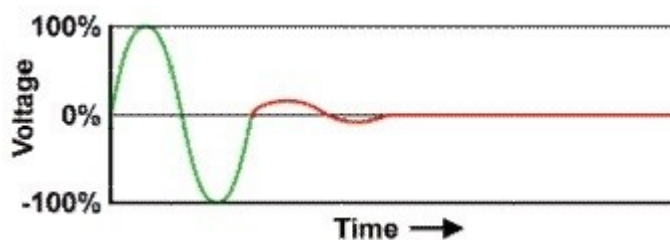
No entanto, o termo "interrupção" é usado frequentemente para se referir a interrupção de curta duração, enquanto a segunda é seguida pela palavra "sustentável" para indicar uma duração longa.

As interrupções são medidas e descritas pela sua duração, pois o valor da tensão é sempre menor que 10% do nominal.

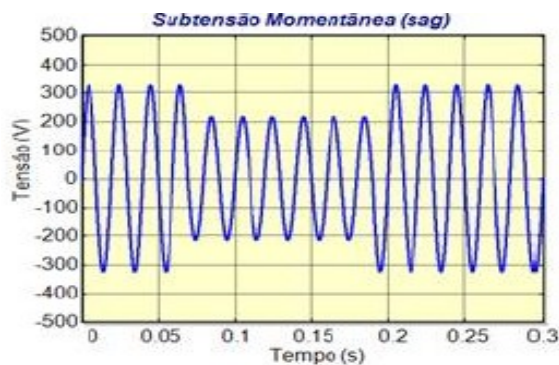
Interrupção momentânea

A Interrupção momentânea é o problema de qualidade de energia com o efeito mais perceptível nas instalações.

Acontece geral no sector industrial, particularmente a indústria de processo contínuo. Além disso, as comunicações e processamento de informações de negócios também são significativamente perturbados.



A Sub-tensão 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.



FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

Figura 7 – Subtensão Momentânea na Tensão (*sag*).

Interrupção de curta duração

Interrupção é definida como a diminuição do nível de tensão para menos de 10% do valor nominal de até 1 (um) minuto de duração. Eles são subdivididos em:

- Instantânea (1 / 2 a 30 ciclos),
- Momentânea (30 ciclos a 3 segundos) e
- Temporária (3 segundos a 1 minuto).

As interrupções momentâneas na sua maioria são o resultado de religamento de disjuntores ou religadores ao tentar recuperar de falhas não permanentes, primeiro a abertura e depois o religamento após um tempo curto. Estes dispositivos estão geralmente na rede sistema transporte ou de distribuição, mas em algumas localidades, as interrupções momentâneas também ocorrer por falhas no sistema de rede local em BT. A extensão da interrupção dependerá da capacidade de religamento do dispositivo de protecção. Por exemplo, religamento instantâneo irá limitar a interrupção causada por uma falha temporária para menos de 30 ciclos. Por outro lado, o tempo de atraso de religamento do dispositivo de protecção pode causar uma interrupção momentânea ou temporária.

Além de falhas do sistema, as interrupções também pode ser devido ao controle de avarias e falhas de equipamento.

Consequências de pequenas interrupções são semelhantes aos efeitos das sub-tensões momentâneas. As interrupções podem causar entre outros as seguintes falhas:

Interrupção de equipamentos sensíveis (ou seja, computadores, PLC, ASD)
Disparos intempestivos desnecessários de dispositivos de protecção
Perda de dados
Falha no equipamento informático.

Interrupção sustentada

Interrupção sustentada é definido pela IEEE 1159 como a diminuição no nível de tensão de alimentação de zero para mais de um minuto (1). É classificado como um fenómeno de longa duração variação de tensão. Interrupções sustentadas são frequentemente de natureza permanente e requerem intervenção manual para a restauração. Além disso, eles são fenómenos específicos da rede eléctrica e não têm relação com o uso. A interrupção sustentada não se refere a um fenómeno específico, mas sim ao estado de um componente da rede que não funcionou. Além disso, no contexto da monitorização da qualidade de energia, a interrupção não tem relação com a confiabilidade ou com a continuidade de outras estatísticas do serviço.

Interrupções sustentadas geralmente são causados por falhas permanentes devido a tempestades, árvores linhas marcantes ou utilidade pólos, ou falha de equipamento de geração na rede interna de energia socorrida ou por descoordenação de dispositivos de protecção (disparos simultâneos não respeitando a regra da selectividade.. Consequentemente, tais distúrbios levam a um desligamento completo da instalação consumidora.

Interrupções momentâneas e Voltage SAG (Cavas ou Quedas de Tensão)

As interrupções momentâneas ocorrem, 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).

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

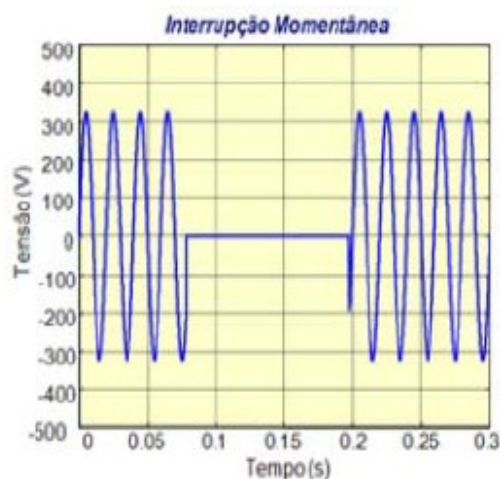
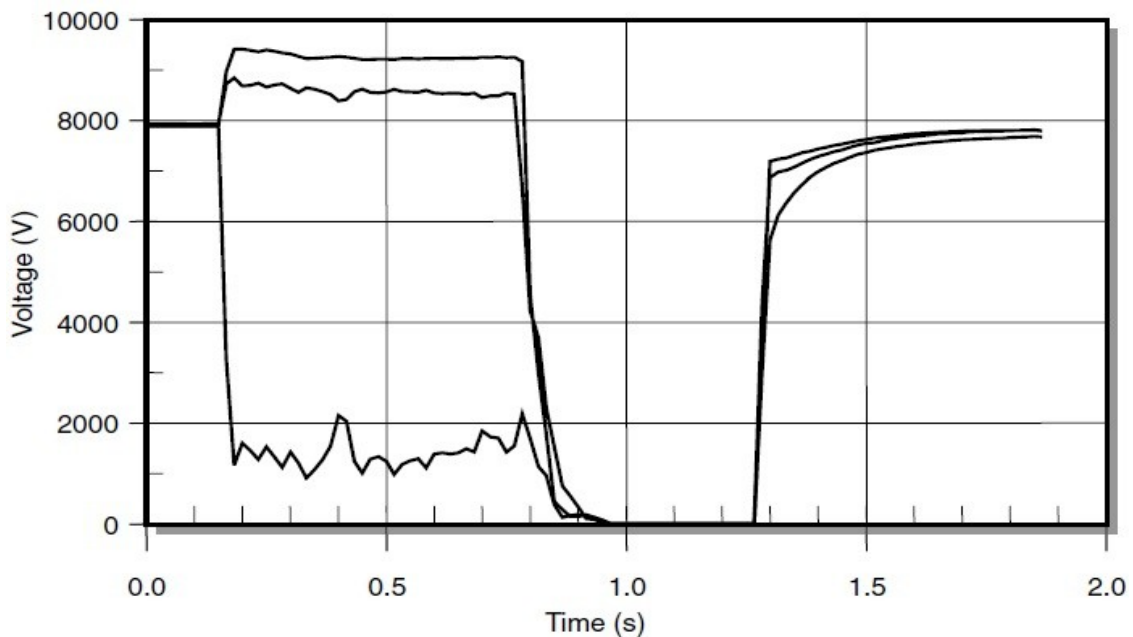


Figura 6 – Interrupção Momentânea na tensão.

Algumas interrupções podem ser precedidas por uma queda de tensão, particularmente quando estes problemas de qualidade da energia são devidos a falhas na rede geradora. As quedas de tensão ocorrem entre o momento em que uma falha se inicia o momento de actuação do dispositivo de protecção. Na rede eléctrica sujeira a um defeito, as cargas vão ter uma queda de tensão imediatamente seguido por uma interrupção. A figura abaixo ilustra uma interrupção momentânea durante o qual a tensão numa fase tem quedas de cerca de 20 por cento durante cerca de 3 ciclos, que, posteriormente, cai para zero para cerca de 1,8 s até o religador do disjuntor volte a fechar o circuito.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE



Interrupção após uma queda de tensão

Além disso, como mencionado, os efeitos das quedas ou interrupções de tensão são quase semelhantes a interrupções. Ainda assim, as interrupções afectam com gravidade o funcionamento da maioria dos consumidores finais, enquanto que as quedas de tensão só têm impacto nos aparelhos mais sensíveis. Por outras palavras, se os outros consumidores no mesmo circuito também são afectados, então, há alta probabilidade de que a perturbação é devida à interrupção e não à queda de tensão.

Interrupção - Prevenção e Protecção

Para evitar interrupções, a rede pode fazer o seguinte:

Reduzir a ocorrência de falhas do sistema

Incluir a instalação de pára-raios, as inspecções de alimentação, poda de árvores e guardas animais

Limitar o número de clientes afectados pela interrupção

Ter as suas redes emalhasadas (em anel)

Melhorar a selectividade através de religadores monofásicos e / ou religadores extra a jusante

Religamento rápido

Para proteger o equipamento de interrupções, os utilizadores finais podem usar uma fonte de alimentação ininterrupta (do tipo on-line) Uninterruptible Power Supply (UPS) e outros sistemas de armazenamento de energia.

Back-up ou auto-geração é necessária para as interrupções sustentadas. Outras soluções incluem o uso de comutadores de transferência estática e restaurador de tensão dinâmica com armazenamento de energia.

Sinopse:

Magnitude: Interrupção curta - menos de 0,10 pu por unidade; Interrupção sustentada - 0,0 pu

Duração: Interrupção curta - ciclo de ½ a 1 minuto ; Interrupção sustentada - Mais de um minuto

Origem : Rede ou instalação de distribuição

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

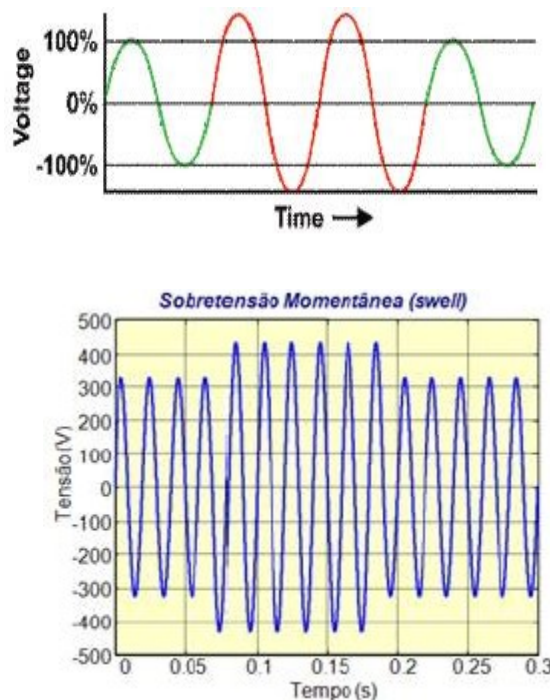
Sintomas: Desligamento “Shutdown” dos equipamentos

Ocorrência: Menos de 2 interrupções / ano nos EUA

Protecção: Fonte de Alimentação Ininterrupta (UPS), a geradores e auto-armazenamento de energia,

– Sobretensão momentânea (voltage swell):

Sobretensão momentânea ou “Swell” de tensão é definido na norma IEEE 1159 como o aumento do nível de tensão RMS de 110% - 180% do valor nominal, na frequência de alimentação, para as durações de $\frac{1}{2}$ ciclo a 1 (um) minuto. É classificado como um fenómeno curta duração de tensão variação, que é uma das categorias gerais da classificação dos problemas de qualidade de energia mencionados acima. “Swell” sobre- tensão é basicamente o oposto da cava de tensão.



Sobretensão Momentânea na tensão (*swell*). Pode ser provocada, entre outros casos, por situações de defeito ou operações de comutação de equipamentos ligados à rede eléctrica.

O distúrbio também é descrito pelo IEEE C62.41-1991 como "um aumento momentâneo da tensão na frequência fundamental da energia entregue pela rede, fora das tolerâncias normais, com uma duração de mais de um ciclo e menos do que alguns segundos". No entanto, esta definição não é a preferida pela comunidade de qualidade de energia.

As sobretensões “Swells” podem ser subdivididas em três categorias (mais uma para sobretensões de longa duração):

Categoria	Amplitude	Duração
Instantânea	1.1 a 1.8 pu	0.5 a 30 ciclos

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

Momentânea	1.1 a 1.4 pu	30 ciclos a 3 segundos
Temporária	1.1 a 1.2 pu	3 segundos a 1 minuto
Longa duração (semi-permanente)	1.1 a 1.2 pu	> 1 minuto

As sobre-tensões são caracterizados pela sua amplitude e duração RMS. A gravidade do problema da qualidade de energia durante uma condição de falha é uma função da impedância do sistema (ou seja, a relação - quociente entre a impedância de sequência-zero e a impedância de sequência-positiva da rede), a localização da falha e da configuração de ligação à terra (“aterramento” em terminologia brasileira) do circuito. Como exemplo: num sistema sem ligação à terra, as tensões de linha-terra na fases boas podem ir tão alto como 1,73 pu durante uma falha de fuga à terra numa única fase - SLG - (Single Line Ground). Pelo contrário, em um sistema aterrado perto da subestação, não haverá aumento de tensão nas fases boas, porque o transformador da subestação é geralmente ligado triângulo-estrela, fornecendo um caminho de baixa impedância de sequência-zero para a corrente de defeito.

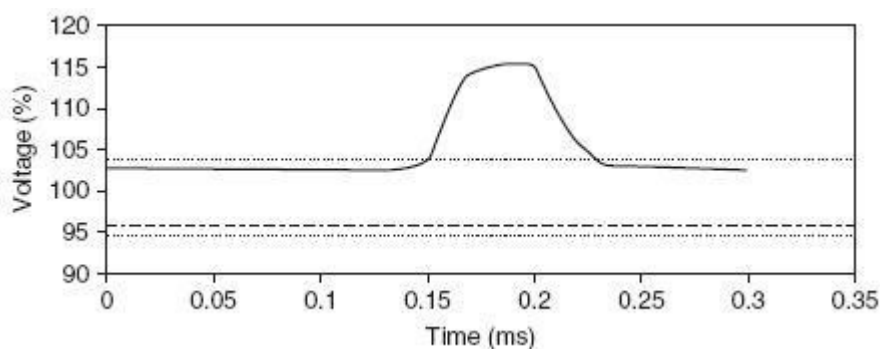
Uso da terminologia “Swell”

O "sobretensão momentânea" termo é usado como um sinónimo para o “Swell”.

De acordo com IEEE 1159-1995, amplitude de sobretensão deve ser descrito por sua tensão em estado estacionário, neste caso, sempre maior do que 1,0 pu. Por exemplo, "uma sobretensão a 150%" significa que a tensão da linha é ampliada para 150% do valor normal.

Causas comuns das sobre-tensões momentâneas “Swells”

As sobre-tensões momentâneas estão normalmente associados com as condições de falha da rede, tal como as cavas de tensão, mas são muito menos comuns. Isto é particularmente verdadeiro para os sistemas em triângulo flutuantes ou seja não ligados à terra (nos sistemas em estrela é usual ter o neutro ligado à terra directamente ou através de um impedância conforme o “Regime de Neutro TN TT ou TI”), onde a mudança repentina no valor de referência à terra resulta num aumento de tensão nas fases (que não têm ligação à terra). No caso de uma onda de tensão devido a uma fuga à terra numa única linha (Single Line Ground) na rede, o resultado é um aumento de tensão temporária na fases boas, com a mesma duração da falha. Isso é mostrado na figura abaixo:



Sobre-tensão “Swell” instantânea devido a corrente de defeito numa só fase (SLG)

As sobre-tensões também podem ser causadas pelo desligamento (deslastramento) de cargas de potência muito elevada. A interrupção abrupta de corrente pode gerar uma tensão grande, a fórmula: $V = L \, di / dt$, onde L é a indutância da linha e di / dt é a mudança (gradiente) na corrente corrente. Além disso, a ligação “energização” de um banco de condensadores de valor elevado também pode causar uma onda de tensão, embora mais frequentemente cause um transitório do oscilatório (oscilação amortecida).

Embora os efeitos de um cava de tensão sejam mais visíveis, os efeitos de uma sobretensão são muitas vezes mais

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

destrutivos. Podem causar avaria de componentes nas fontes de alimentação dos equipamentos, embora o seu efeito possa ser um efeito gradual e cumulativo. As sobre-tensões podem causar problemas de controle e falhas de hardware nos equipamentos, devido ao sobre-aquecimento o que poderá eventualmente resultar em desligamento. Além disso, os equipamentos eletrónicos e outros equipamentos sensíveis são propensos a avarias devido às sobre-tensões.

Sinopse:

Magnitude: 1,1-1,8 pu

Duração: ciclo de $\frac{1}{2}$ a 1 minuto

Origem: Rede ou consumidores

Sintomas: O mau funcionamento ou desligamento

Ocorrência: Muito baixa

Protecção: o isolamento de tensão

Dispositivo atenuantes: Transformadores de tensão constante (CVT), restaurador dinâmico de tensão (DVR)

– 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).

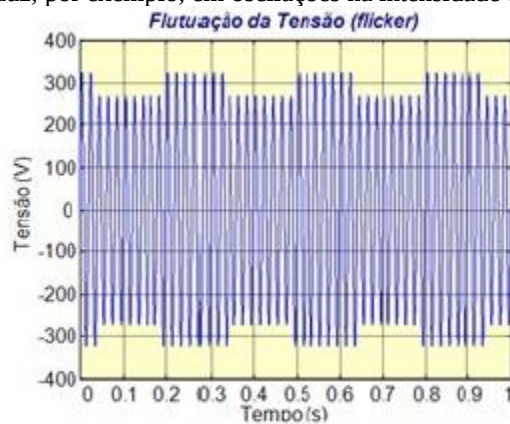
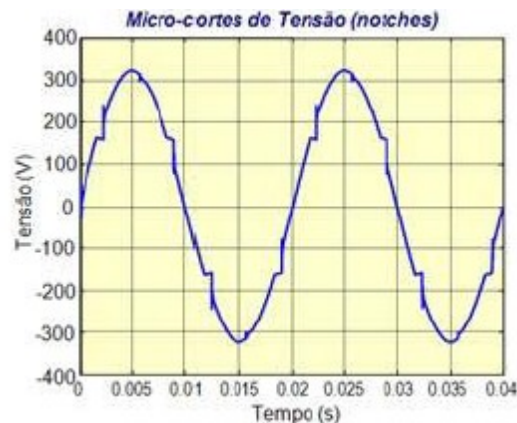


Figura 9 - Flutuação da tensão (flicker).

- 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).



FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

Figura 10 - Micro-cortes na tensão (notches).

- Transitórios: ocorrem como resultado de fenómenos transitórios, tais como a comutação de bancos de condensadores ou descargas atmosféricas.

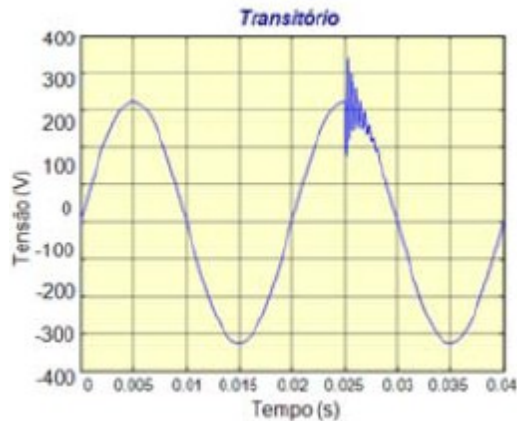
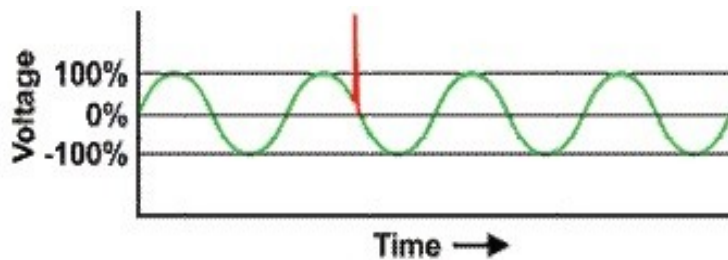


Figura 11 - Transitórios na tensão

Os transitórios (em terminologia inglesa transients) são distúrbios de qualidade de energia que envolvem elevadas amplitudes de tensão e ou corrente, geralmente destrutivas . Pode chegar a milhares de volts e amperes mesmo em redes de baixa tensão. No entanto, tais fenómenos têm uma duração muito curta de menos de 50 nanossegundos até cerca de 50 milissegundos. Este é o mais curto dos problemas da Qualidade da Energia, daí o seu nome. Os Transitórios geralmente incluem frequências anormais, que poderão chegar a tão alto quanto 5 MHz.



Além disso, os transitórios são também conhecidos como descargas. De acordo com IEEE 100, descarga (brasileiro surto inglês surge) é uma onda transitória de tensão, corrente ou de potência num circuito eléctrico. Outras definições IEEE sugerem que é o gradiente (a parte da mudança) numa variável que desaparece durante a transição de uma condição de funcionamento em estado estacionário para outro.

Essa descrição é muito vaga, e poderia ser usado para descrever praticamente qualquer eventos incomuns que ocorrem no sistema eléctrico. Além disso, a maioria dos engenheiros electrotécnicos remete para o campo de uma oscilação amortecida todos os fenómenos transitórios em um circuito RLC ao ouvir tal termo.

Fontes de Transitórios

Relâmpagos ou descargas atmosférica

Actividades de comutação motores de escovas ou certos comutadores electrónicos

· Abertura e fechamento de circuitos em linhas sob tensão

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

- Comutação de bancos de condensadores
 - Operações de religamento
 - Mudança de tomadas em transformadores de várias tomadas para regulação de tensão
 - Maus apertos de conexões e descargas nos isoladores na rede de distribuição de que resulta a formação de arco
- Acidentes, erros humanos, os animais que causam descargas e as condições de mau tempo
Instalações vizinhas

Efeitos dos transitórios

Equipamentos electrónicos:

Mau funcionamento dos equipamentos e corrupção nos resultados
Especificação e instalação inadequadas de TVSS podem agravar as falhas
A eficiência de dispositivos electrónicos é reduzida

Motores:

Os transitórios se forem frequentes causarão elevação das temperaturas de funcionamento por aumento das perdas por histerese no ferro.
Podem resultar em micro-acelerações levando a vibração do motor e excesso de calor e ruído
Degradam o isolamento do enrolamento do motor, resultando na falha do equipamento.

Luzes:

Falha na lâmpada fluorescente e balastros especialmente se forem do tipo electrónico
Aparecimento de anéis pretos no tubo fluorescente extremidades (indicador de transitórios)
Danos prematuros no filamento filamento, levando à insuficiência da luz incandescente.

Equipamentos eléctricos

Os transitórios degradam as superfícies de contacto de disjuntores e interruptores
Disparo intempestivos de disjuntores dando falsas indicações de um excesso de consumo na realidade inexistente
Reduz a eficiência e a vida útil dos transformadores por causa do aumento das perdas de histerese e rupturas do isolamentos dos enrolamentos e entre enrolamentos

Os danos devido a problemas a problemas de transitórios menos comuns em relação às quebras de tensão e interrupções, mas quando ocorrem são mais destrutivos. Para se proteger contra transitórios, os utilizadores finais podem usar Supressores ou Descarregadores de sobre-tensão transitória (TVSS), enquanto na rede se instalam pára-raios.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

Além disso, os transitórios são classificados como:

1. Impulsivos
2. Oscilatórios

Sinopse:

Magnitude: Vários milhares de volts e amperes

Duração: <ns 50-50 ms

Origem: Faíscas ou actividades de comutação

Sintomas: danos nos componentes electrónicos

Ocorrência: Baixo

Dispositivos atenuantes: Descarregadores de sobretenção -TVSS e Pára-raios

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

MONITORIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉCTRICA

A utilização de monitorizadores e analisadores 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 “Sobre-tensões e Sub-tensões 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 13 - Sistema de Monitorização

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

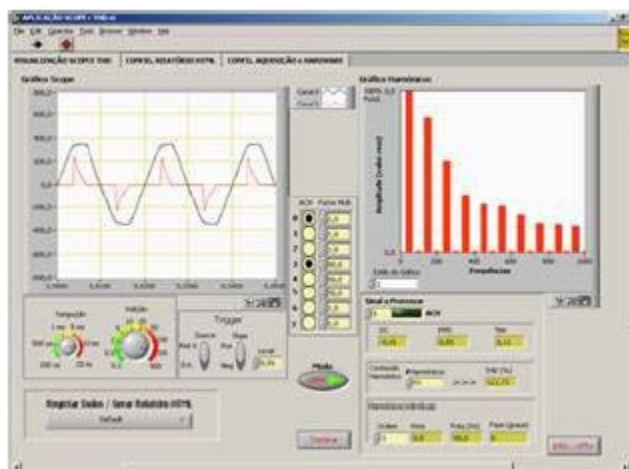


Figura 14 - Interface da aplicação “Osciloscópio e Distorção Harmónica”

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

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 transitórios, 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 como 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.

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).

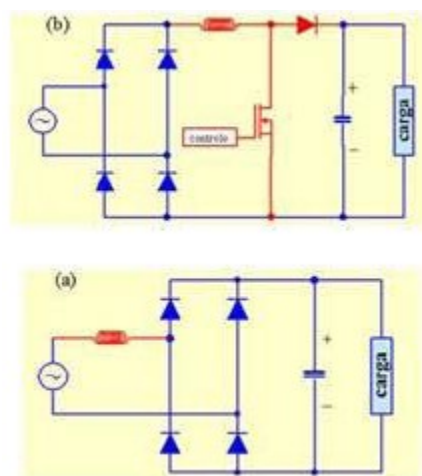


Figura 15 - Soluções para redução dos harmónicos de corrente à entrada dos equipamentos: (a) indutor em série; (b) conversor step-up

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

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 sobre-dimensionados, 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 sobre-tensões, sub-tensões ou mesmo interrupções momentâneas.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

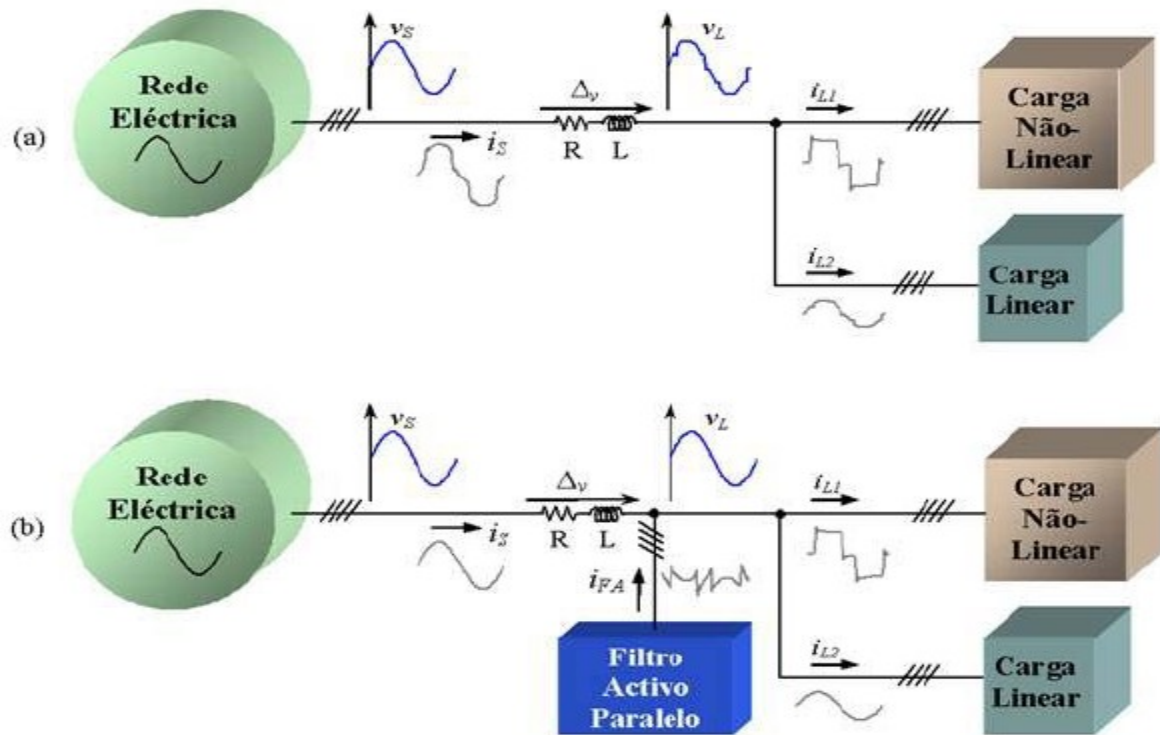
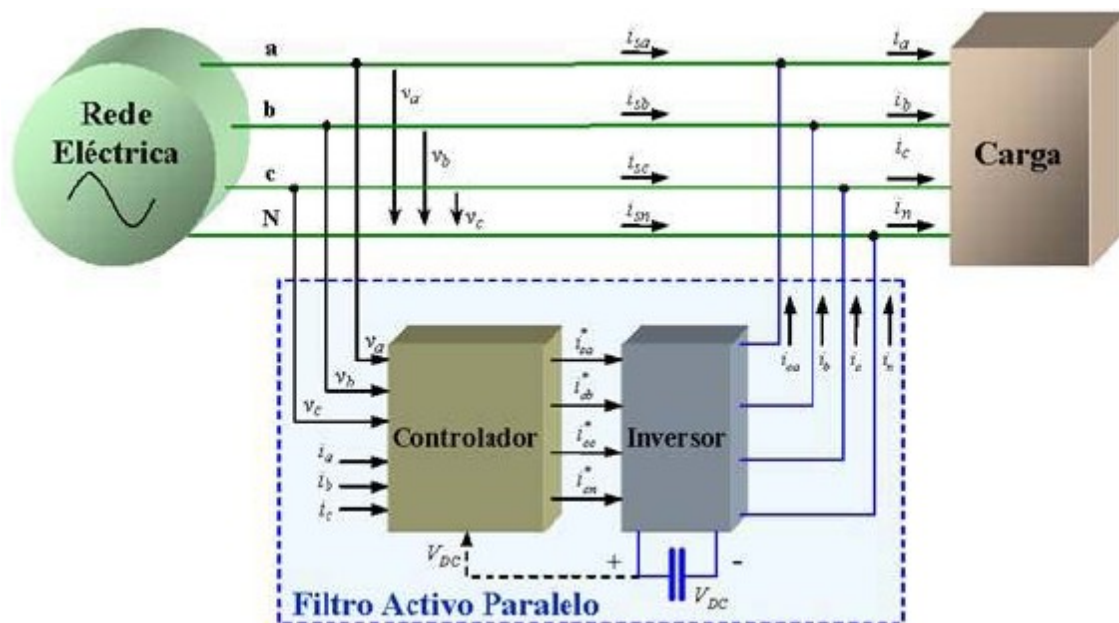
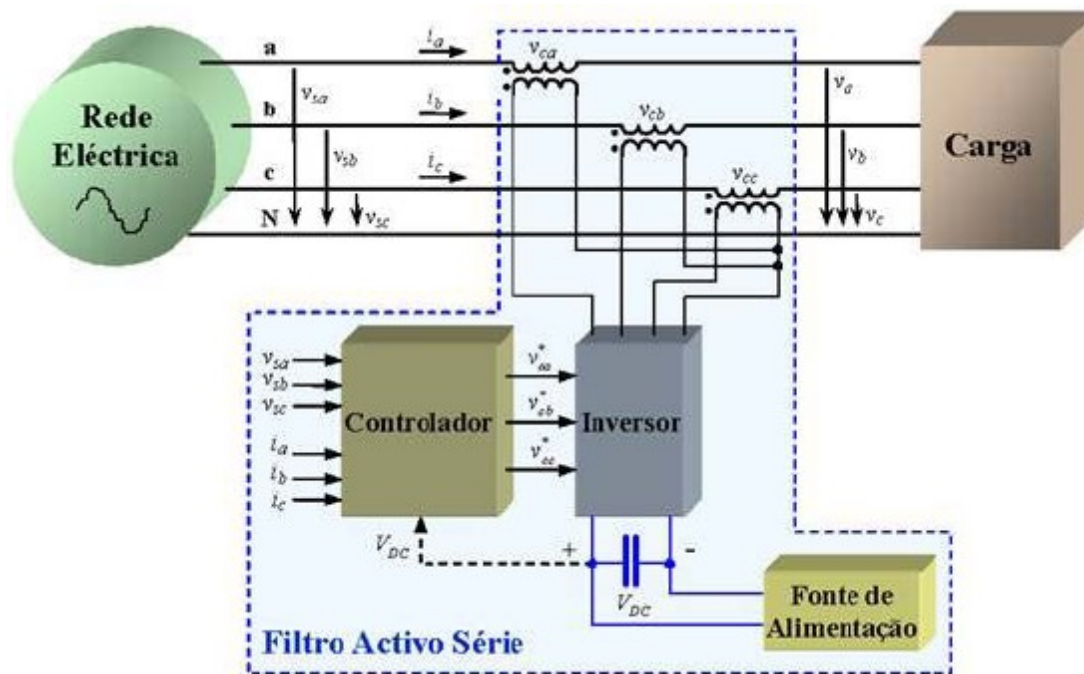


Figura 16 - Operação de um sistema eléctrico com carga não linear: (a) sem compensação; (b) com compensação por um filtro activo paralelo



FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

17 - Esquema de um filtro activo paralelo



18 - Esquema de um filtro activo série

METODOLIGIA APLICÁVEL NA RESOLUÇÃO DOS PROBLEMAS DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉCTRICA

Os passos aplicáveis na resolução de problemas de qualidade de energia, geralmente incluem interacção entre o sistema de abastecimento da rede e as instalações do cliente. Isto é porque os problemas de qualidade de energia têm causas diferentes que podem ser rastreados, tanto a rede como os utilizadores finais. Consequentemente, estão disponíveis diferentes soluções para de melhorar a qualidade de energia e desempenho do equipamento.

O processo de resolução de problemas também deve considerar se a avaliação envolve um problema de qualidade de energia existente ou que poderia resultar de num projecto novo ou em propostas de alteração para o sistema eléctrico em estudo.

Os passos básicos na resolução de problemas de qualidade de energia envolvem as seguintes acções:

Identificar o tipo de problema	Falta de regulação, desequilíbrios de tensão, falha na sequência de fases, erro de frequência Flutuação de tensão Sobre-tensões sub-tensões interrupções micro-cortes transitórios e ruídos de alta frequência Distorção harmónica
Caracterizar	Medição e recolha de dados → Causas → Características → Impactos
Identificar o âmbito das soluções	Rede de transmissão Rede de distribuição

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

	PT e rede de BT Rede eléctrica do consumidor Equipamentos / desenho e especificações
Avaliar as Soluções encontradas	Modelos e análise de procedimentos → Avaliação de alternativas técnicas
Escolher e aplicar a solução optimizada	Avaliação económica das possíveis soluções

1. Identificar o problema de qualidade de energia

Isto é muito importante uma vez que esta será a base para as soluções a serem considerados. É importante o conhecimento e experiência nos diferentes problemas de qualidade de energia (isto é, tensão sag / swell, interrupções, harmónicos, etc.)

2. Caracterização problema de qualidade de energia.

Este passo na resolução de problemas de qualidade de energia inclui a colecta de dados e medições. As medidas são o principal método de caracterizar o problema ou o sistema existente que está sendo avaliado. Além disso, é essencial para registar os impactos das variações de qualidade de energia, ao mesmo tempo, que se realizar as medições - para que os problemas possam ser facilmente correlacionados com as possíveis causas. Analisadores de Qualidade de Energia e Medidores de desempenhar um papel vital nesta parte.

3. Identificar e propor soluções para o problema

As soluções de qualidade de energia são identificadas em todos os níveis do sistema a partir da rede (nível da transmissão e nível da distribuição) até aos equipamentos dos consumidores finais que sejam afectados. Esta etapa deve incluir uma visão completa dos equipamentos da capacidade dos dispositivos para atenuar os problemas da qualidade da energia.

4. Avaliar as soluções propostas.

As soluções propostas são então avaliadas com base em ambos os aspectos técnicos e económicos. Limitações também são considerados nesta etapa. As soluções do problema de qualidade de energia são primeiramente avaliados e seleccionados tecnicamente para determinar sua viabilidade. Seguidamente, somente as alternativas tecnicamente viáveis são comparadas em termos económicos.

5. Escolha da solução ideal.

Basicamente, a solução que pode resolver o problema de qualidade de energia presente na instalação com o menor custo é a solução ideal. Em suma, é a alternativa mais rentável. Vai depender do número de utilizadores finais que são afectados, do tipo de problema de qualidade de energia e das possíveis soluções.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

Classificação da importância e prioridade de correcção

Classifica-se importância da perturbação com base nos seguintes critérios:

Intensidade (obviamente) ou potência da perturbação.

Duração e ciclo de repetição.

Forma como afecta os consumidores ligados nos circuito dependentes do QG da mesma instalação de consumo

Forma como afecta os consumidores externos dependentes do mesmo PT público.

Forma como afecta as protecções destinadas à segurança de pessoas.

Prioridade de actuação	Tipo	Magnitude	Duração
Sem prioridade	Instantânea	1.1 a 1.8 pu	0.5 a 30 ciclos
Prioridade média	Momentânea	1.1 a 1.4 pu	30 ciclos a 3 seg
Prioridade imediata	Temporária	1.1 a 1.4 pu	3 seg a 1 min

Sendo que uma perturbação intensa frequente ou permanente que afecte o funcionamento de consumidores internos (especialmente electrónicos), que afecte a segurança de pessoas ou circuitos de missão crítica, que produza graves prejuízos económicos ou ainda que se propague ao exterior, tem de ser considerada grave e têm de ser tomadas medidas imediatas para a sua eliminação sob pena de perante a legislação o consumidor perturbador ser considerado civilmente responsável pelos danos causados nos consumidores ou na rede, podendo o distribuidor unilateralmente cancelar o fornecimento de energia eléctrica.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

CONCLUSÃO

Apresentou-se, de forma sucinta, um assunto actual e de grande relevância para as empresas: o problema da qualidade de energia eléctrica. Por causa 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 podem levar à interrupção de processos de fabrico, acarretando em prejuízos muito elevados.

Os problemas da Qualidade da Energia Eléctrica podem ser resolvidos quando as suas causas são identificadas e se adoptam as medidas apropriadas para a sua correcção.

FORMAÇÃO EM ELECTRICIDADE

Referências bibliográficas

[4.1] "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems." Project IEEE-519. October 1991.

[4.2] "Sine-wave Distortions in Power Systems and the Impact on Protective Relaying." Report prepared by the Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society. Novembro 1982.

[4.3] Blog em inglês sobre o tema e métodos de classificação da perturbação

Almeida, A., Delgado J., and Moreira, L. (nd). Power Quality Problems and New Solutions

Dugan, R., McGranaghan, M., Santoso, S., and Beaty, H.W. (2004). Electrical Power Systems Quality (2nd Ed.). New York: McGraw-Hill.

IEEE 1159-1995. Recommended Practice For Monitoring Electric Power Quality. New York: IEEE, Inc.

[http://powerqualityworld.blogspot.com/2 ... asics.html](http://powerqualityworld.blogspot.com/2...asics.html)

Dugan, R., McGranaghan, M., Santoso, S., e Beaty, HW (2004).Qualidade de Energia Elétrica de Sistemas (2^a ed.). New York: McGraw-Hill

Trabalhos feitos pelo Departamento de Electrónica Industrial da Universidade do Minho no âmbito da solução dos problemas da Qualidade da Energia Eléctrica

Bingham, R. (1998). *SAGs and SWELLS*. New Jersey: Dranetz-BMI

Leng, O.S. (2001). *Simulating Power Quality Problems*

Utility Systems Technologies, Inc. (2009). *Power Quality Basics*