Universidade do Porto
FEUP Faculdade de Engenharia

Licenciatura em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

INSTALAÇÕES ELÉCTRICAS INDUSTRIAIS

- PERTURBAÇÕES NA TENSÃO E SEUS IMPACTOS NA EXPLORAÇÃO DE REDES ELÉCTRICAS INDUSTRIAIS -

4º Ano da Licenciatura - Ramo de Energia

JOÃO ABEL PEÇAS LOPES

(Professor Associado Agregado da FEUP)

PERTURBAÇÕES NA TENSÃO E SEUS IMPACTOS NA EXPLORAÇÃO DE REDES ELÉCTRICAS INDUSTRIAIS

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As concessionárias de distribuição de electricidade empenham-se em fornecer o produto energia eléctrica procurando garantir a qualidade da onda de tensão, de forma a que esta seja caracterizada nomeadamente por uma tensão sinusoidal à frequência de 50 Hz, com valor eficaz não inferior ao estabelecido contratualmente e não desequilibrada no caso de sistemas trifásicos.

Contudo, é fisicamente impossível assegurar e manter a qualidade perfeita da tensão atendendo a que nem os equipamentos de produção o conseguem completamente nem os aparelhos de utilização absorvem sinusóides perfeitas de corrente. Por outro lado, a existências de fenómenos transitórios subsequentes a curto-circuitos na rede e ligações e cortes de circuitos induzem perturbações nas tensões.

Nos últimos anos tem-se assistido à proliferação de equipamentos de utilização electrónicos que, por um lado são geradores de perturbações, e por outro são muito sensíveis à qualidade do produto electricidade. Em unidades industriais existem um grande número de processos monitorizados e controlados por computadores e outros sistemas electrónicos que são muito sensíveis às perturbações das tensões de alimentação. Tem-se assim tornado necessário definir critérios de avaliação da qualidade do produto energia eléctrica, relacionando-os com os limites de admissibilidade de perturbações aceitáveis pelos equipamentos de utilização.

A definição destes critérios exigem a caracterização das perturbações possíveis e o estabelecimento de procedimentos e normas de medição. Um esforço significativo tem sido realizado nos últimos em vários comités técnicos da CIGRE, UNIPEDE, CENELEC e IEEE no sentido de estabelecer normas e critérios de avaliação relativamente à qualidade do produto energia eléctrica.

As principais irregularidades que podem afectar a tensão da rede são nomeadamente:
- variações lentas do módulo da tensão,
- variações de frequência,
- desequilíbrios das tensões trifásicas;
- poluição proveniente de harmónicos,
- variações bruscas da tensão (resultantes por exemplo de comutações de cargas),
- flutuações rápidas e cíclicas da tensão (efeito de flicker),
- ocos de tensão e micro-cortes,
- sobretensões de curta duração (resultantes da manobra de aparelhos de corte),
- sinais de telecomando centralizado.

Estas perturbações têm frequentemente origem em dispositivos de conversão energética existentes em unidades industriais que são responsáveis pela poluição da rede interna local, bem como da rede de distribuição pública, afectando assim outros consumidores. Exemplos desses equipamentos são fornos de arco, aparelhos de soldadura, motores monofásicos, conversores estáticos tiristorizados, etc.

Assim, a necessidade de limitar as perturbações geradas por dispositivos existentes em redes eléctricas industriais tem conduzido a que durante a concepção e o acompanhamento da exploração das redes se prodeda ao dimensionamento e localização de equipamentos limitadores das perturbações eventualmente geradas.

Neste documento procura-se descrever os critérios de avaliação da qualidade de tensão, identificar as principais fontes de poluição, os problemas que advêm para os equipamentos de utilização e para a rede devido à existência deste tipo poluição eléctrica, e finalmente identificar procedimentos que permitem limitar essa poluição. Serão ainda descritas metodologias de cálculo para avaliação das consequências das perturbações eléctricas e do grau de penetração das distorções e perturbações geradas.

O problema da qualidade da onda tem vindo a ser enquadrado na qualidade de serviço como uma das 3 vertentes normalmente consideradas neste tema. Em Portugal, o Regulamento de Qualidade de Serviço e a

Norma Portuguesa NP-EN 50.160 definem os indicadores de qualidade da onda que devem ser assegurados aquando do fornecimento da energia eléctrica aos consumidores finais.

2. CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ONDA DE TENSÃO

As variações lentas da tensão (geralmente subsequentes a variações rápidas) e as variações de frequência da rede resultam da ocorrência de perturbações usuais no funcionamento do sistema eléctrico de energia, resultando por exemplo de variação e ligação ou corte de cargas, reconfiguração da rede, saída intempestiva de serviço de unidades geradoras, sendo em geral resolvidas rapidamente pelos sistemas de controlo existentes.

Outras irregularidades existem que necessitam de uma avaliação mais cuidada e que podem estar ligadas a critérios de adimissibilidade. Assim são de salientar:
- Distorção da onda de tensão resultante da presença de harmónicos,
- Desiquilibrio de tensões trifásicas,
- Ocos de tensão,
- Variações rápidas e cíclicas da tensão (efeito flicker).

De referir que ao nível dos aparelhos de utilização doméstica, alimentados em BT, existem normas (EN 50-006 do CENELEC) que definem os limites das perturbações aceitáveis pela rede pública na sequência do seu funcionamento. Contudo, na rede pública de distribuição de energia é difícil de estabelecer o nível global de perturbações existente dado o desconhecimento sobre o grau de simultaneidade de funcionamento dos equipamentos e atendendo à presença de cargas industriais heterogéneas com características de funcionamento complexas.

Nestas condições das características da irregularidade de tensão da rede não podem ser expressas em termos determinísticos, mas antes em termos probabilísticos. Assim, os critérios de avaliação do grau de poluição eléctrica da rede são definidos com base numa metodologia probalistica, conforme mais adiante de descreve.

São considerados pela CEI os seguintes intervalos de tempo de análise para efeitos de avaliação da qualidade de tensão quando se procede à realização de medidas exaustivas em determinados pontos da rede:
- Tvs - ("very short interval"), correspondente a 3s;
- Tsh - ("short interval") 10 minutos;
- T_L - uma hora;
- T_D - 24 horas;
- Twk - uma semana.

De acordo com o intervalo de tempo são definidos os seguintes parâmetros para avaliação da qualidade da tensão :

- Medida realizada em Tvs

$$U_{vs} = \sqrt{(\sum_{k=1}^{N} u_{x,k}^2)/N} \tag{2.1}$$

onde N é o número **i** de medidas u_x, efectuadas em Tvs (3s), sendo u_x relativo ao tipo de análise que se pretende efectuar (exemplo: harmónico de ordem h, desiquilíbrio de tensão, etc.).

- - Medida realizada em Tsh

$$U_{sh} = \sqrt{(\sum_{i=1}^{N} U_{vs,i}^2)/N} \tag{2.2}$$

onde N é o número **i** de medidas U_{vs}, efectuadas em Tsh (10 minutos), sendo mais uma vez U_{vs} relativo ao tipo de análise que se pretende efectuar (exemplo: harmónico de ordem h, desiquilíbrio de tensão, etc.). Esta avaliação durante períodos de 10 minutos permite dar uma ideia dos efeitos de aquecimento nas canalizações ou aparelhos de utilização provocados por exemplo por harmónicos.

Avaliações semelhantes às Tvs e Tsh podem ser realizadas para períodos de 1 hora (T_L). Contudo, a Comissão Electrotécnica Internacional considera opcional a realização das medidas em T_L.

- Valor máximo de U_{vs} verificado num periodo de 24 horas definido por

$$\text{Máx}\{\, U_{vs} \text{ para TD} \,\}$$

Os periodos de observação e medida devem ser estendidos a pelo menos uma semana para se obter uma imagem o mais completa possível da forma como o regime de laboração afecta a distorção da tensão nas suas várias componentes. Para esse periodo devem ser retidos:

- Os valores máximos de U_{vs};
- Os valores máximos de U_{sh}.
- O valor de $U_{vs\ 95\%}$;
- O valor de $U_{vs\ 99\%}$;

Os valores $U_{vs\ 95\%}$ e $U_{vs\ 99\%}$ definem referencias estatisticas associadas com os conceitos de probabilidade acumulada, e são respectivamente os valores de U_{vs} que só serão excedidos em 5% e 1% das vezes durante o período em análise.

Conforme se referiu, recomenda-se uma abordagem probabilística deste problema pelo que é importante calcular ainda os valores $U_{vs\ 95\%}$, e $U_{vs\ 99\%}$. A título de exemplo, descreve-se na figura 1 o significado de $U_{vs\ 95\%}$, que corresponde ao valor de Uvs que apenas é ultrapassado, durante a semana, em apenas 5% das vezes. Neste caso (0.05x7 = 0.35 dias).

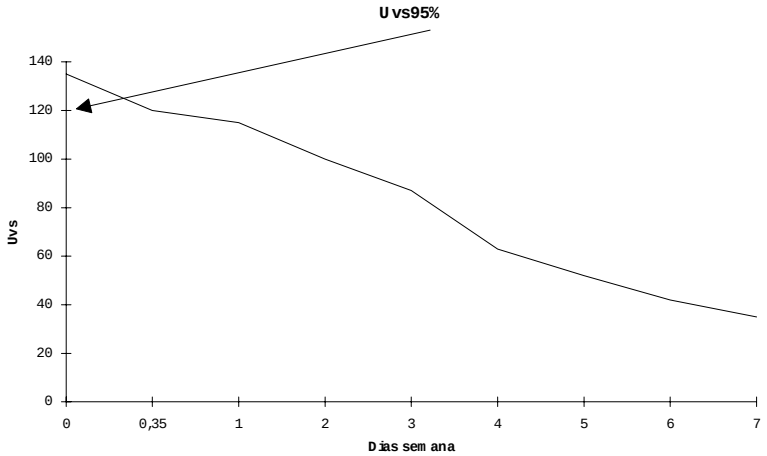


Figura 1 - Curva acumulada dos valores de Uvs observados durante Twk

Todos estes valores podem ser utilizados para comparação com valores de referência a fixar, nomeadamente com valores de compatibilidade de funcionamento dos equipamentos de utilização.

Para uma avaliação final recomenda-se ainda a apresentação dos resultados em gráficos onde com maior facilidade se pode avaliar a evolução de cada uma das variáveis sob observação. Na figura 2 apresenta-se, a título de exemplo, a evolução da taxa global de harmónicos durante um dia. Outro tipo de indicadores podem ser analisados através desta abordagem, havendo já equipamentos de medida que disponibilizam este tipo de informação gráfica.

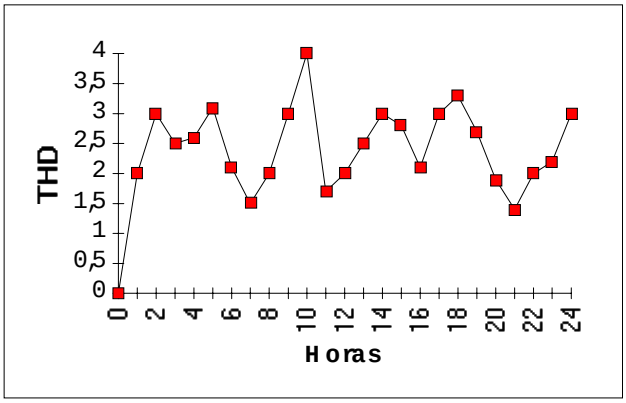


Figura 2 - Evolução da taxa global de distorção harmónica ao longo de um dia

Relativamente ao caso da medição do efeito de flicker existem outros parâmetros que são descritos noutra secção deste texto. Contudo, as avaliações nos períodos de 10 minutos, 1 hora ou 2 horas, um dia são também recomendadas. As análises gráficas e estatísticas são de igual forma adoptadas.z

3. PROBLEMAS DE HARMÓNICOS

3.1 Natureza do Problema

A presença de harmónicos na tensão da rede resulta de deformações da forma de onda da tensão de alimentação e de deformações da forma de onda da corrente absorvida por alguns equipamentos que, por sua vez, induzem deformações na forma de onda da tensão. Por vezes os harmónicos podem ser introduzidos na rede devido a indução electromagnética, nomeadamente no caso de induções provocadas por linhas de energia sobre redes de telecomunicações.

Entre as principais fontes de poluição de harmónicos encontram-se as cargas não-lineares, tais como: fornos de arco, rectificadores, conversores de frequência (utilizados no controlo de velocidade de motores), indutâncias saturáveis, controladores de factor de potência estáticos, electrodomésticos (televisões, etc.), lampadas de descarga gasosa.

Para além destas também os alternadores, as máquinas assíncronas e o transformadores introduzem harmónicos na rede. Contudo, a taxa de distorção introduzida por estas máquinas é bastante limitada atendendo a especificações de construção que são normalmente seguidas.

Para além das distorções harmónicas podem existir ainda na rede tensões a frequências não harmónicas que assim contribuem para a deformação global da forma de onda.

Nos alternadores os harmónicos surgem devido às variações de entreferro ou variações de fluxo polar que induzem deformações na forma de onda da f.e.m..

Nos transformadores, devido à saturação e histerese do circuito magnético verifica-se que, quando alimentado por uma onda de tensão sinusoidal, o fluxo resultante que se cria é por sua vez sinusoidal, aparecendo no entanto deformada a forma de onda da corrente de magnetização. Supondo um transformador em vazio, para que o fluxo seja simusoidal e atendendo à curva de saturação e histerese teremos:

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

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

A figura 3 descreve a curva de magnetização de um transformador e a relação daí resulta entre o fluxo e a corrente de magnetização. Quando o efeito de histerese é considerado a corrente de magnetização dexa de ser simétrica relativamente ao seu valor máximo.

Esta corrente de magnetização é em geral rica em harmónicos ímpares - 3º, 5º, 7º, 9º e 11º. Em transformadores com ligações estrela/triângulo os terceiros harmónicos e os seus múltiplos são eliminados como é do conhecimento geral. Os 5º e 7º harmónicos podem no entanto introduzir distorções significativas. No entanto, uma vez que a corrente de magnetização é uma parcela muito pequena da corrente que passa por um transformador em carga, esta poluição acaba por assumir um valor bastante reduzido.

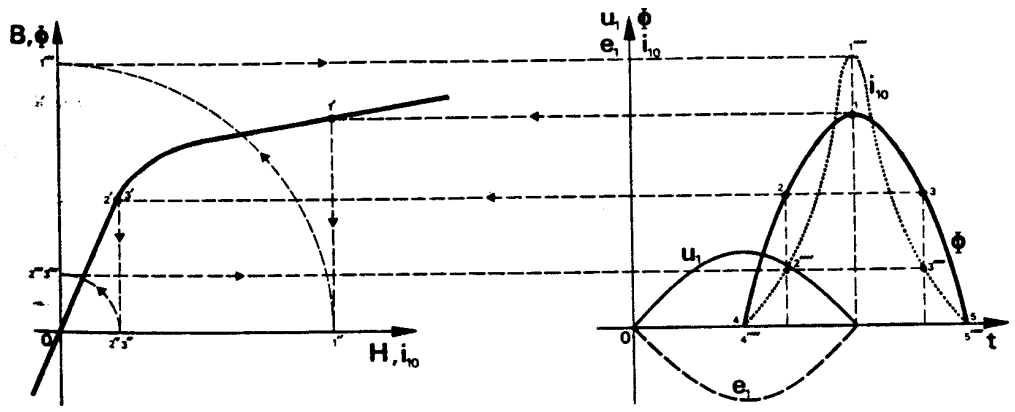


Figura 3 - Distorção da corrente de magnetização em transformadores

3.2 CARACTERÍSTICAS DAS PRINCIPAIS FONTES DE HARMÓNICOS

As principais fontes de produção de harmónicos são os conversores e os interruptores estáticos controlados com tiristores. Estes podem ser agrupados em três grandes grupos: a) grandes conversores geralmente utilizados na indústria de tratamento de metais e em transmissão em corrente contínua em alta tensão, b) conversores AC/DC/AC de média dimensão utilizados para controlo de motores (nomeadamente motores de indução alimentados em frequência variável) e c) pequenos rectificadores utilizados em televisões ou carregadores de baterias.

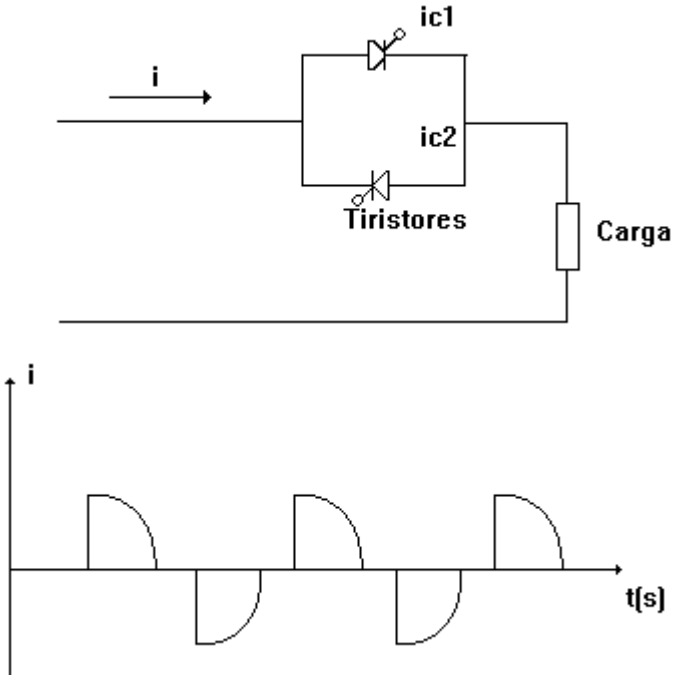


Figura 4 - Regulação de potência por controlo de fase

A título de exemplo observe-se a figura 4, onde se representa a forma de onda da corrente da rede que alimenta um conversor tiristorizado comandado por controlo de fase. A deformação que assim ocorre na corrente de fase traduz-se na existência de componentes harmónicas.

Nos conversores estáticos trifásicos do tipo apresentado na figura 5, a corrente de fase da rede apresenta o aspecto indicado na figura 6.

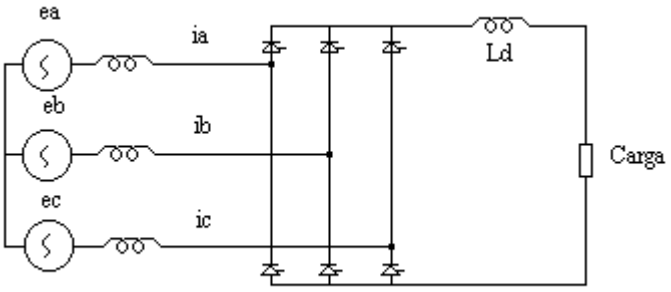
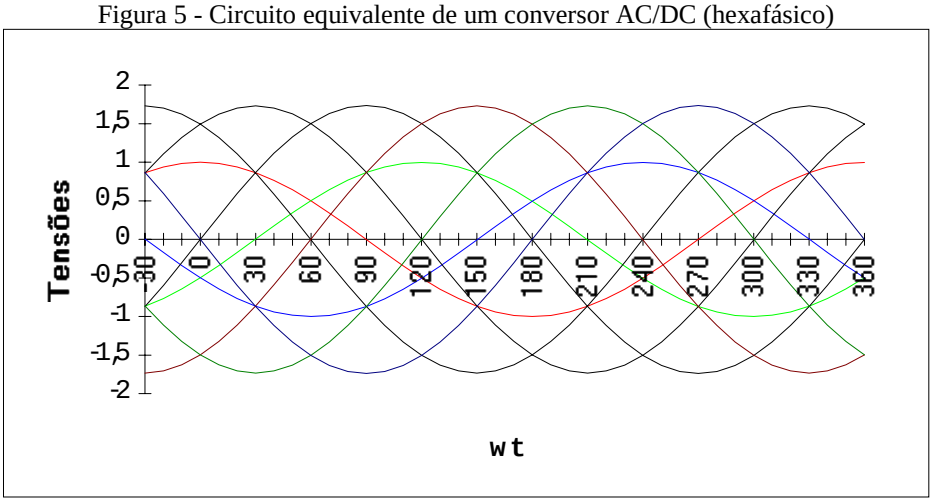


Figura 5 - Circuito equivalente de um conversor AC/DC (hexafásico)



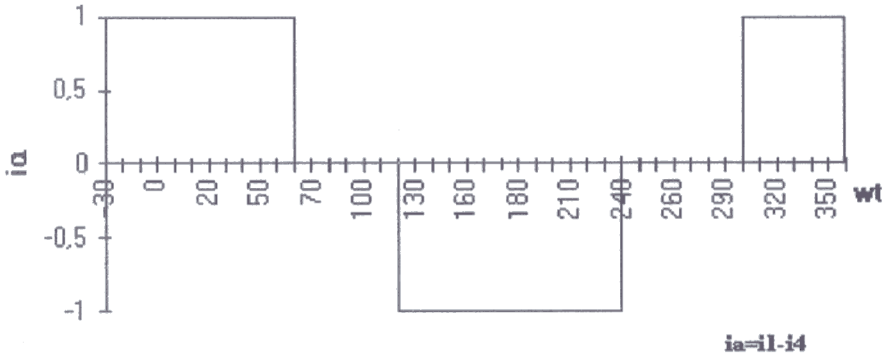


Figura 6 - Formas de onda das correntes e tensões para análise do funcionamento do conversor

A corrente de fase na rede assume a forma rectangular representada na figura 6, atendendo a que se admite que a indutância de alisamento assume um valor muito elevado, de tal forma que pode ser considerada como infinita para efeitos de análise do problema.

De facto, a expressão matemática que define a forma de onda da corrente quando um dos circuitos inicia a sua condução é obtida, atendendendo a que quando uma tensão sinusoidal é aplicada sobre uma carga R,L temos:

$$V_m \sin(wt) = Ri + L\frac{di}{dt} \tag{3.1}$$

A corrente **i** na linha é então definida pela expressão:

$$i = Ke^{-Rt/L} + \frac{V_m}{\sqrt{(R^2 + (wL)^2)}} sen(wt - \Phi) \tag{3.2}$$

onde $\Phi = \tan^{-1}(wL/R)$.

Relembrando que a indutância total vista pela fonta é muito elevada atendendo à presença da indutância de alisamento, quando os tiristores se encontram em condução a corrente na fase é composta por arcadas sinusoidais associadas a um termo exponencial

$$i = Ke^{-Rt/L}$$

sendo L muito elevado a corrente **i** rectificada pode então ser considerada como aproximadamente constante e apenas dependente das condições iniciais do início da condução.

Tendo em conta os períodos de condução dos tiristores do conversor da figura 5, a forma de onda da corrente na **fase a** (correspondendo às tensões e_{ab}, e_{ac}, e_{ba} e e_{ca}) consiste numa sequência de impulsos rectangulares alternados, conforme se representa na figura 6. A largura destes impulsos é de w=2π/p, sendo p o número de fases utilizada pelo sistema AC que alimenta o conversor (p=3 no caso da figura 6).

Admitindo que esta sequência de impulsos pode ser decomposta em duas sequências de implusos unitários, uma de valores positivos e outra com valores negativos, e que a origem da sequência positiva está centrada no meio de um dos implusos rectangulares, então a onda de corrente de impulsos positivos pode ser decomposta em série de Fourier da seguinte forma:

$$i(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(\frac{2\pi nt}{T}) + b_n sen(\frac{2\pi nt}{T})) \tag{3.3}$$

A sequência de impulsos positivos é uma função par dado que f(x)=f(-x), pelo que a série de Fourier apenas contém termos em coseno. Desta forma, os termos relevantes da decomposição em série de Fourier, relativamente à sequência de impulsos unitários positivos, são:

$$A_0 = \tfrac{1}{2\pi} \int_{-w/2}^{w/2} 1 d(\omega t) = \tfrac{w}{2\pi} = \tfrac{1}{p} \tag{3.4}$$

sendo ω=2πf0, com f0=50 Hz;

$$A_n = \tfrac{1}{\pi} \int_{-w/2}^{w/2} \cos(n\omega t) d(\omega t) = \tfrac{2}{\pi n} sen(\tfrac{nw}{2}) = \tfrac{2}{\pi n} sen(\tfrac{\pi n}{p}) \tag{3.5}$$

Assim, a sequência de termos positivos pode ser expressa da seguinte forma:

$$i^+ = \tfrac{2}{\pi}(\tfrac{w}{4} + sen\tfrac{w}{2}\cos\omega t + \tfrac{1}{2} sen\tfrac{2w}{2}\cos 2\omega t + \tfrac{1}{3} sen\tfrac{3w}{2}\cos 3\omega t + .\cdots) \tag{3.6}$$

Aplicando as equações (3.4) e (3.5) à sequência de impulsos negativa teremos a seguinte série de Fourier:

$$i^- = \tfrac{2}{\pi}(-\tfrac{w}{4} + sen\tfrac{w}{2}\cos\omega t - \tfrac{1}{2} sen\tfrac{2w}{2}\cos 2\omega t + \tfrac{1}{3} sen\tfrac{3w}{2}\cos 3\omega t - .\cdots) \tag{3.7}$$

Finalmente combinando as equações (3.6) e (3.7) teremos:

$$i = i^+ + i^- = \tfrac{4}{\pi}(sen\tfrac{w}{2}\cos\omega t + \tfrac{1}{3} sen\tfrac{3w}{2}\cos 3\omega t + \tfrac{1}{5} sen\tfrac{5w}{2}\cos 5\omega t + .\cdots)$$

A componente de corrente contínua e os harmónicos pares foram assim eliminados.

No caso do conversor da figura 6 em que w=2π/3, o valor da corrente na fase a) assume então a seguinte forma:

$$i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi}(\cos\omega t - \frac{1}{5}\cos 5\omega t + \frac{1}{7}\cos 7\omega t - \frac{1}{11}\cos 11\omega t + \cdots)$$

Verifica-se então que para este conversor os harmónicos de terceira ordem desapareceram, existindo, no entanto, harmónicos de ordem 6k+-1, em que k é o número de arcadas de tensão que são aplicadas sobre a carga. De referir ainda que a amplitude do harmónico de ordem n é dada por

$$I_n = I_1 / n.$$

sendo I_1 a amplitude da componente fundamental.

Para além destes harmónicos existem ainda harmónicos fraccionários e sub-harmónicos, resultantes e imprecisões nos instantes de disparo dos tiristores, bem como outros fenómenos transitórios.

Outras Fontes de Harmónicos

Outras fontes de harmónicos existem, nomeadamente lâmpadas fluorescentes e fornos eléctricos. Assim, nas lampadas fluorescentes a corrente aparece aparece deformada por harmónicos ímpares. Tipicamente teremos para a amplitude do harmónico de ordem n:

$$I_n = 0.5\, I_1 / n^2$$

Geralmente predomina o terceiro harmónico (5 a 6% da componente fundamental). Desta forma, as correntes destes harmónicos são aditivas no neutro, verificando-se assim que existe uma sobrecarga neste condutor devido à soma das correntes harmónicas de fase.

Os fornos de arco são também fortemente poluidores, apresentando este forno um espectro típico semelhante ao representado na figura 7.

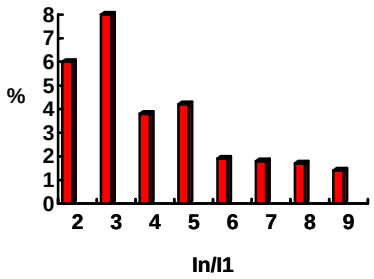


Figura 7 - Espectro típico de um forno de arco trifásico

Para além dos fornos eléctricos podem-se ainda referir-se os seguintes dispositivos, como produtores de hármónicos:

- indutâncias saturáveis para compensação de energia reactiva capacitiva;
- sistemas de controlo de baterias de condensadores para compensação de energia reactiva;
- conversores AC/DC de interligação à rede de centrais fotovoltaicas e geradores eólicos DC;
- interruptores estáticos utilizados por exemplo na ligação de geradores assíncronos à rede pública.

3.3 Medição de Harmónicos

Os problemas com a poluição harmónica têm aumentado progressivamente ao longo dos anos e com eles as queixas dos consumidores à medida que se vão apercebendo dos efeitos negativos da sua presença. Em países como Portugal esta questão é completamente ignorada pelos consumidores domésticos. Contudo, alguns consumidores industriais começam começam a sofrer as consequências desta poluição, que frequentemente tem origem nas suas próprias instalações.

Para avaliar o grau de poluição harmónica e resolver os problemas com ela relacionados é necessário implementar todo um processo de recolha de medidas e seguidamente procurar comparar os valores detectados com parâmetros definidos em documentos normativos, como os que se referiram anteriormente.

A avaliação do grau de poluição harmónica deve ser efectuado através da medição do valor de correntes ou tensões harmónicas detectáveis junto dos locais onde a sua presença possa provocar consequências graves para o sistema e para os equipamentos. Assim recomenda-se a recolha de dados em:
- na vizinhança das fontes de harmónicos;
- nos nós da rede onde existem ou venham a ser instaladas baterias de condensadores.

Para este efeito recorre-se a analisadores de espectros bastante sofisticados, baseados na transformada rápida de Fourier, e que determinam em tempo real as amplitudes dos harmónicos a partir do valor de uma grandeza eléctrica de entrada. Existem actualmente sistemas que avaliam taxas de distorção, possuem capacidade de harmazenamento das medidas efectuadas e disponibilizam uma vasta quantidade de indicadores e gráficos da evolução temporal do grau de poluição detectada. Estes indicadores baseiam-se nos valores das medições efectuadas nos intervalos de tempo definidos pela CEI e que se recorda são:

- Tvs - ("very short interval"), correspondente a 3s;
- Tsh - ("short interval") 10 minutos;
- T_L - uma hora;
- T_D - 24 horas;
- Twk - uma semana.

A recolha destas medidas exige, contudo, alguns cuidados adicionais dado que a presença de transformadores de medida intercalares pode introduzir distorções nas grandezas a amostrar. Assim, para medidas de tensão, em vez dos transformadores de tensão, recorre-se frequentemente a divisores capacitivos. No caso da medição de grandezas de corrente recorre-se por vezes a transformadores de intensidade baseados no efeito de Hall, medindo-se a corente através do campo magnético que ela induz na sua vizinhança. De referir, contudo, que a solução vulgarmente seguida passa pela utilização dos transformadores de medida da própria instalação.

Em redes de muito alta tensão existe uma dificuldade adicional que reside na distorção introduzida pelas capacidades dos cabos de ligação dos equipamentos de medida aos transformadores.

3.4 Efeitos dos Harmónicos

Os efeitos da poluição harmónica revelam-se quer ao nível das redes de distribuição de energia quer ao nível do funcionamento dos equipamentos dispersos pelo sistema. Assim os problemas que podem ocorrer são, entre outros, os seguintes:

1. As linhas e os cabos de transporte de energia registam perdas óhmicas suplementares, dada a circulação das correntes harmónicas ($I_{h)}$ e atendendo ao facto de, devido ao efeito pelicular, a sua resistência para essas componente variar de acordo com o harmónico (Rh= R√h - para componente de ordem h); As perdas totais são assim calculadas como:

$$\Sigma I_h^2 R_h$$

2. Nos cabos eléctricos trifásicos de BT verifica-se um acréscimo das perdas nos condutores de retorno (neutro), devido à eventual circulação dos hramónicos de corrente homopolar de 3ª ordem, acrescidos de perdas dieléctricas suplementares.

3. Os harmónicos de corrente provocam perdas óhmicas suplementares nos enrolamentos principais e nos enrolamentos amortecedores dos alternadores; por outro lado a interacção entre correntes harmónicas e o campo magnético fundamental pode originar binários oscilatórios que provocam vibrações no veio dos alternadores e consequentemente o aumento da fadiga mecânica das máquinas;

4. Nos transformadores os harmónicos de corrente provocam o aumento das perdas nos enrolamentos e os harmónicos de tensão criam correntes de Foucault e perdas histeréticas suplementares nos circuitos magnéticos; a possibilidade de ressonância entre as capacidades da rede e os enrolamentos do transformador com as suas indutâncias e capacidades distribuidas pode também ocorrer;

5. Nos motores assíncronos ocorrem aumentos nas perdas por efeito de Joule, com o consequente sobreaquecimento dos enrolamentos estatóricos, e por efeito pelicular uma distribuição assimétrica da corrente induzida nas barras rotóricas, o que por sua vez provoca vibrações com torção do veio da máquina;

6. O corte das correntes com elevada taxa de distorção harmónica provoca dificuldades acrescidas ao funcionamento dos disjuntores; as componentes de alta frequência têm uma variação mais rápida na passagem por zero da corrente o que dificulta o corte da corrente;

7. O tempo de vida útil das lâmpadas de incandescência é fortemente reduzido (a redução pode atingir metade da vida útil se a taxa global de distorção harmónica for superior a 5%);

8. Televisores, relés de protecção, computadores e sistemas de contagem de energia podem apresentar perturbações funcionais significativas;

9. Os sistemas telecomandados centralmente por frequências musicais podem apresentar funcionamentos intempestivos totalmente indesejáveis; geralmente estes sistemas são sintonizados para frequências diferentes das dos harmónicos múltiplos da frequência fundamental, mas pode verificar-se uma actuação intempestiva para uma frequência próxima.

10. Os condensadores são fortemente afectados pela poluição harmónica, ocorrendo três tipos de problemas:
    a) Sobrecargas de potência

    As perdas dieléctricas num condensador são dadas por:

$$p = UI_c \cos \varphi_c = U.UC\omega \, tg\delta$$

    Em que I_c é a corrente que percorre o condensador e U é a tensão aplicada a este. A corrente I_c pode ser decomposta em duas componentes (I_p em fase com a tensão e I_q em quadratura com esta). O ângulo de perdas dieléctrico é então definido como:

$$tg\delta = I_p/I_q$$

As perdas dieléctricas podem então ser calculadas através de $p = U\ Iq\ tg\delta = U^2C\omega\ tg\delta$, dado que $Iq = UC\omega$.

Atendendo a que a potência reactiva é dada por $Q=U^2C\omega$ podemos finalmente escrever que:

$$p = Q\ tg\delta$$

Donde se conclui que o aumento da potência reactiva terá como consequência o aumento das perdas dieléctricas, uma vez que o ângulo de perdas dieléctricas depende apenas das características do material existente no dieléctrico. Se a tensão aplicada ao condensador possuir componentes harmónicas a potência reactiva divide-se por duas parcelas, uma devida à componente fundamental e outra associada aos harmónicos existentes, ficando

$$Q = Q_1 + Q_{ht}^{(*)}$$

Desta forma quando Q_{ht} aumenta então as perdas dieléctricas aumentam.

Usualmente as baterias de condensadores apresentam possibilidades de sobrecarga de cerca de 35%, relativamente aos valores nominais, o que permite o seu funcionamento em redes com presença de poluição harmónica, havendo contudo a necessidade de garantir que este valor não é ultrapassado.

b) Sobrecargas de corrente

Para além das perdas dieléctricas existem perdas de Joule suplementares nas ligações interiores e armaduras, devido à existência harmónicos da onda de corrente. De facto a corrente é dada pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos **h** termos harmónicos ($I = \sqrt{(\Sigma i_h^2)}$).

Assim, quanto maior for o nível da poluição harmónica maior será o valor eficaz da corrente, o que obviamente se traduz numa sobrecarga de corrente.

A normalização do fabrico de condensadores impõem normalmente que a corrente máxima admíssível não seja superior a 1.3 vezes a corrente nominal.

A título de exemplo vejamos a seguinte situação em que se admite apenas a presença de um termo harmónico **h** para além da frequência fundamental. Assim teremos:

$$i^2 = i_1^2 + i_h^2$$

Então teremos

$$i_h^2 = i^2 - i_1^2$$

Se admitirmos que i = 1.3 p.u. relativamente à corrente nominal, teremos:

$$i_h^2 = (1.3)^2 - i_1^2$$

o que, se admitirmos que i_1=1 p.u., equivale a um valor para i_h^2 de aproximadamente 0.7.. Assim o valor de $i_h = \sqrt{(0.7)} = 0.84$ p.u..

(*) O conceito de potência reactiva num sistema com grandezas eléctricas de corrente e tensão não sinusoidais não tem significado físico; contudo a CIGRE definiu a componente reactiva harmónica da potência como $Q_{ht} = \Sigma\ V_h\ I_h\ \sin\varphi_h$; refira-se ainda que a potência aparente total num sistema com uma componente harmónica significativa pode ser definida pela relação $S= \sqrt{(P^2 + Q^2 + D^2)}$ onde D é uma componente adicional designada por potência de distorção.

Sabendo que $i_h = j\omega h C u_h$ (sendo u_h a tensão harmónica de ordem h) e admitindo $\omega C = 1$, dado que $u_1 = 1$ p.u. e $i_1 = 1$ p.u., podemos escrever que $i_h = h\, u_h$.

Assim, a título de exemplo teremos para h=5 uma $u_h = 0.17$ e para h=11 teremos u_h=0.08 p.u. Tal significa que uma pequena tensão harmónica em harmónicxos de elevada ordem pode provocar sobrecarga nos condensadores.

De referir ainda que os equipamentos de corte instalados para ligar e desligar baterias de condensadores devem estar preparados para efectuar cortes de correntes de valores superiores à nominal no caso de se suspeitar da existência de poluição harmónica da rede.

c*) Perigos de Ressonância*

O maior perigo para o funcionamento de baterias de condensadores em unidades industriais advém da possibilidade do aparecimento de um circuito ressonante que se cria com as capacidades da bateria de condensadores e indutâncias da rede.

Consideremos por exemplo uma unidade industrial ligada à rede pública através de um transformador MT/BT onde existe uma bateria de condensadores para correcção do factor de potência, cargas convencionais e umconversor estático gerador de harmónicos. O esquema unifilar e o correspondente circuito equivalente desta situação estão representados na figura 8.

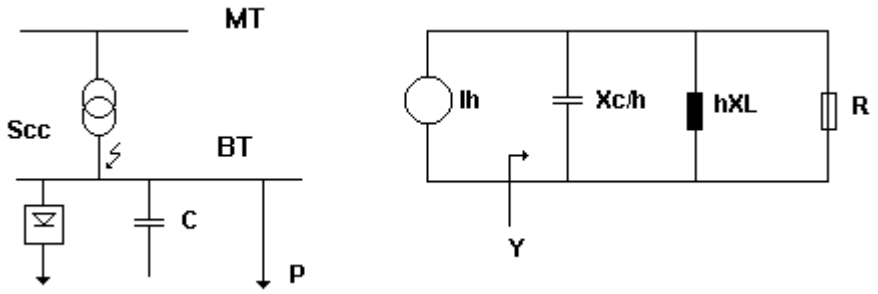


Figura 8 - Esquema unifilar da instalação industrial e circuito eléctrico equivalente

No esquema eléctrico equivalente o conversor estático está substituido por uma fonte de corrente com injecção de correntes harmónicas. Os elementos inductivos da rede, incluindo o equivalente da rede pública visto para montante representado pela potência de c.c. (Scc), estão agrupados na reactância XL. A reactância da bateria de condensadores está representada por Xc.

Assim temos:

$$XL = j\omega L \qquad R = U^2/P \qquad Xc = -j\, 1/(\omega C)$$

e a admitância para o harmónico de ordem h é definida por:

$$Y = \frac{1}{R} + j\left(\frac{h}{Xc} - \frac{1}{hXL}\right) \tag{3.8}$$

A condição de ressonância coincide com o mínimo desta admitância, pelo que é fácil de verificar que o harmónico que provoca a ressonância paralelo deste circuito é dado por:

$$h = \sqrt{(Xc/XL)} \tag{3.9}$$

Relembrando que a potência da bateria de condensadores Qc pode ser definida por $Qc = U^2 Xc$, onde U é a tensão da rede no barramento onde a bateria está ligada, e que $XL = U^2 Scc$, então pode-se escrever que a frequência de ressonância é aproximadamente dada por:

$$h = \sqrt{(Scc/Qc)}$$

A esta frequência corresponde um factor de amplificação da tensão que tem valores típicos entre 2 e 4, podendo atingir em casos extremos o valor 10. Daqui resulta que a tensão aplicada a uma bateria de condensadores de uma rede industrial onde existe a sobreposição de várias correntes harmónicas pode atingir valores elevados, especialmente se uma das frequências poluidoras estiver próximo da frequência de ressonância da rede no local. Tal facto pode levar à destruição da bateria de condensadores.

Pelas três razões apontadas torna-se pois necessário tomar fortes precauções em redes com forte poluição harmónica e onde existam baterias de condensadores.

3.5 Taxa Admissível de Harmónicos

Devido aos efeitos negativos da presença de harmónicos nas redes torna-se então necessário definir limites para a sua aceitação. Os indicadores que traduzem o grau de distorção harmónica numa rede baseiam-se em medidas a efectuar nos periodos definidos na secção 2 deste texto, associadas a outros parametros tais como:

- taxa individual do harmónico de ordem h

$$t_h = \frac{A_h}{A_1}$$

onde A_h é a amplitude do harmónico de ordem h e A_1 a amplitude da componente fundamental.

- taxa global de distorção harmónica

$$D = \frac{1}{A_1}\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} A_h^2} \qquad (3.10)$$

Para os níveis da baixa tensão o CENELEC e a CEI definiram normas que limitam a taxa de produção harmónica nestas redes, nomeadamente nas normas EN50.006 (1975) e CEI 555 (1982).

A título de exemplo, refira-se ainda que a EDF limita também, ao nível da média tensão, as perturbações harmónicas geradas por clientes ligados a esta rede. As medições são efectuadas nos pontos de ligação à rede e são indicadas no quadro seguinte.

Tipo de Harmónico	Limite da th (%)
Par Ímpar	th < 0.6 th < 1
D < 1,6 %	

3.6 Meios Disponíveis para Limitar as Perturbações

Quando a distorção harmónica ultrapassa os limites toleráveis, definidos por normas ou se verificam perturbações graves no funcionamento dos equipamentos da rede torna-se necessário implementar medidas correctivas para limitar esta poluição.

Por outro lado, verifica-se frequentemente que os conversores estáticos absorvem uma elevada potência reactiva da rede o que exige a instalação local de baterias de condensadores para realizar essa compensação. Contudo, um dimensionamento dessas baterias que não tome em consideração a frequência própria de oscilação do circuito LC, que assim se cria, e a eventual poluição harmónica proveniente do conversor, pode provocar efeitos destrutivos sobre os equipamentos instalados.

Redução de Harmónicos na Própria Fonte

Uma das medidas seguidas consiste na redução dos harmónicos produzidos junto da sua própria fonte. Sabendo que em grande parte dos casos a produção harmónica tem lugar nos conversores AC/DC, foram estudadas medidas que permitem a redução da distorção harmónica nestes casos. Indicam-se de seguida algumas das medidas que podem ser adoptadas.

1 - Utilização de rectificadores caracterizados por um maior número de impulsos de tensão aplicados sobre a carga DC.

Com efeito, verifica-se por exemplo que um conversor de 12 implusos, conseguido à custa de utilização de 2 transformadores com enrolamentos em triângulo e estrela (cujas tensões de saída estão esfasadas de 30°), apenas gera harmónicos de corrente de ordem 12k+/-1. Esta constatação pode ser efectuada recorrendo a uma análise semelhante à que se descreveu para o conversor de 6 impulsos descrito na secção 3.2. Verifique-se nomeadamente que os 5º e 7º harmónicos são eliminados com este tipo de montagens:

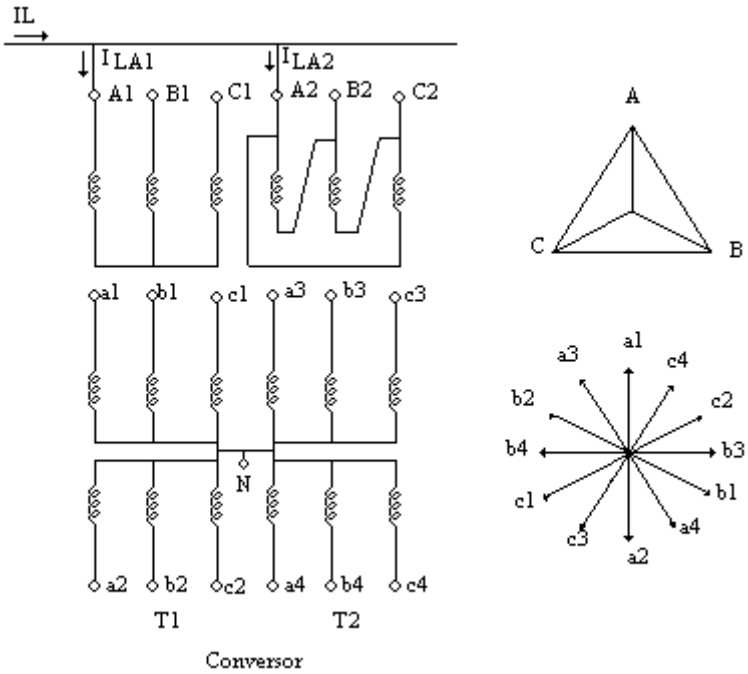


Figura 9 - Esquema de ligações dos transformadores que alimentam um conversor AC/DC dodecafásico

Para o caso do 5º harmónico de corrente, gerado no conversor, verifica-se que as correspondentes correntes I_{LA1} e I_{LA2} quando adicionadas se cancelam. Para compreender correctamente o que se passa torna-se necessário avaliar as correntes que passam nos enrolamentos primários A1, A2-B2 e C2-A2. Admitindo todas as correntes em p.u. e que:

$I_{A1} \approx I_{a1} = I5 \cos(5\omega t)$

$I_{LA2} = I_{A2B2} - I_{C2A2} \approx Ia3 - Ic3 = I5\cos(5\omega t + 5x30) + I5 \cos(5\omega t - 5x30) = I5 \cos(5\omega t - 180)$

Assim, as correntes I_{A1} e I_{LA2} estão em oposição de fase, pelo que a corrente da fase A fica IL = $I_{A1} + I_{LA2}$. e assim se reduz a poluição harmónica injectada na rede.

2 - Atenuação recorrendo a indutâncias anti-harmónicas

Este tipo de medida recorre à instalação de indutâncias em série com as baterias de condensadores utilizadas para a compensação do factor de potência. A figura seguinte mostra um esquema simplificado da montagem que se efectua. Neste caso o conjunto bateria de condensadores / indutância funciona como um filtro passa baixo.

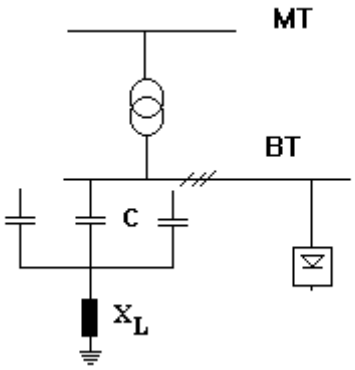


Figura 10 - Utilização de indutância anti-harmónica

A indutância X_L é dimensionada de modo a formar com X_C um circuito de frequência própria inferior à do harmónico de menor ordem existente no barramento onde a bateria de condensadores se encontra ligada.

Por exemplo, se X_L=0.05X_C à frequência de 50 Hz evita-se com esta montagem os perigos de ressonância para harmónicos de ordem superior ao 5º. Assim para o 5º harmónico X_L = 5x0.05X_C = 0.025X_C e X_{C5}= X_C/5 = 0.2 X_C, o que equivale a que o circuito LC apresente um comportamento indutivo para frequências superiores ou iguais aos 250 Hz. Por outro lado, para a frequência fundamental o circuito continua a ser predominantemente capacitivo como se pretende.

3 - Instalação de Filtros de Harmónicos

O método mais vulgarizado e eficaz de eliminação da poluição harmónica em redes consiste na instalação de filtros constituídos por circuitos LC série, sintonizados para as frequências que se pretende eliminar, e instalados junto dos pontos de injecção dessa poluição ou nos locais críticos da rede. Nas instalações onde existem conversores hexafásicos é usual serem instalados filtros que curt-circuitam ascorrentes harmónicas de 5ª, 7ª e 11ª ordem. Junto de fornos de arco é normal procurar filtrar-se todos os harmónicos entre o 2º e o de 7ª ordem. Nas subestações de conversão AC/DC para transmissão HVDC, utilizando conversores dodecafásicos, filtram-se os 11º e 13º harmónicos e recorre-se ainda a filtros passa alto com os quais se filtram as frequências de ordem superior à 13ª. Na figura 11 mostra-se o esquema unifilar típico de uma instalação deste tipo.

De referir ainda que frequentemente procura-se conciliar simultaneamente num circuito LC deste tipo funções de filtragem e de compensação de factor de potência. Nas secções seguintes apresentam-se os principios gerais ligados ao dimensionamento e instalação de filtros de harmónicos.

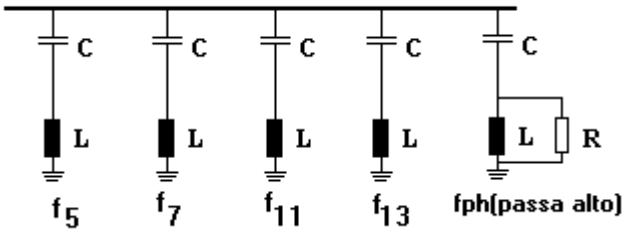


Figura 11 - Esquema unifilar de um conjunto de filtros sintonizados parra as frequências indicadas

Como se sabe a admitância de um circuito LC puro tem uma amplitude infinita e fase nula para a frequência de ressonância ω_0. Sendo

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

A instalação e afinação destes equipamentos acarreta um elevado número de problemas que tornam a solução global complexa e difícil como adiante se descreve.

3.8 Príncipios Gerais de Projecto de Filtros

O projecto de filtros de harmónicos exige o conhecimento prévio de alguns parâmetros que influenciam o comportamento e a performance destes dispositivos. Por outro lado é necessário ter presente que estes filtros podem realizar duas funções, conforme se tem vindo a referir:

- Reduzir a distorção harmónica da tensão nas redes de transporte e distribuição de energia e atenuar a interferência electromagnética com redes de transmissão de sinal devido aos harmónicos de corrente;
- Fornecer parte ou a totalidade da potência reactiva necessária para efectuar a compensação de factor de potência de acordo com o definido no sistema tarifário.

De referir que os filtros nunca são ideais e portanto o seu circuito equivalente é o indicado na figura 12.

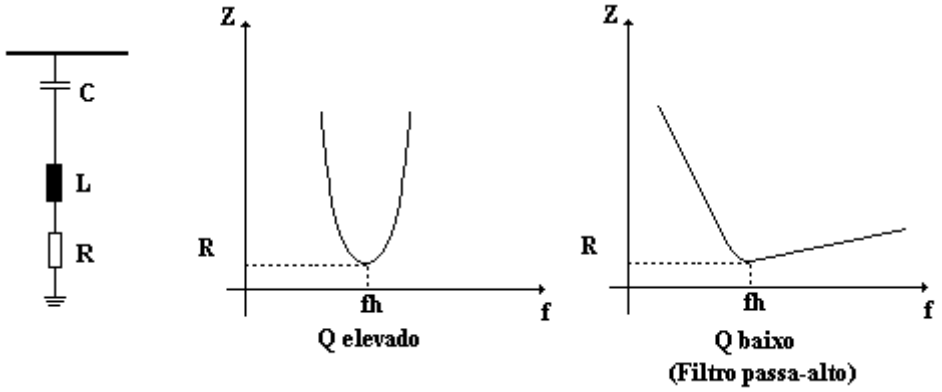


Figura 12 - Filtro real e sua resposta em frequência

Comecemos então por definir os parâmetros necessários ao projecto dos filtros:

- *Frequência de sintonia* fh, correspondente à frequência para aqual a reactância indutiva iguala a reactância capacitiva, sendo definida por

$$f_h = 1/(2\pi\sqrt{LC})$$

De referir que à frequência de sintonia, fh, a impedância do filtro é definida como Zh = R.

- Factor de qualidade do filtro Q, associado com o "grau de largura" da banda de sintonia. Este factor é definido por:

$$Q = X_0 / R \qquad (3.11)$$

  sendo X0 a reactância da capacidade ou da indutância do filtro à frequência de sintonia fh, (X_0 = whL = 1/(whC) = √(L/C).

- Factor de des-sintonização (na literatura anglo-saxónica designado de "detuning") relativamente à frequência de sintonia - δ. Este factor é definido por:

$$\delta = (\omega - \omega h) / \omega h$$

e deve-se a existirem variações nos valores da capacidade e indutância do filtro (devidos por exemplo à influência de factores externos do tipo ambiental), bem como a eventuais variações na frequência fundamental, o que é contudo raro em redes fortemente interligadas.

Exemplo:

Variações de 2% na indutância ou na capacidade do filtro conduzem a variações no valor da frequência de sintonia.

$$f\,h = \frac{1}{2\pi}\frac{1}{\sqrt{LnCn}} \qquad (3.12)$$

(sendo Ln e Cn os valores nominais e de projecto da indutância e da capacidade)

Atendendo às eventuais variações destes valores a frequência de sintonia efectiva do filtro é neste caso dada por:

$$f = \frac{1}{2\pi}\frac{1}{\sqrt{0.98^2\,LnCn}}$$

Por vezes o factor de des-sintonia é ainda definido como:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f\,h} + \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta L}{Ln} + \frac{\Delta C}{Cn}\right) \qquad (3.13)$$

ou por

$$\omega = \omega h\,(1+\delta) \qquad (3.14)$$

ΔL e ΔC são as variações da indutância e da capacidade devidas às tolerâncias de fabrico dos próprios elementos, associadas com influência de variações da temperatura nomeadamente no valor da capacidade C.

3.9 Projecto de Filtros

Definidos o tipo de filtro, a frequência de sintonia, o factor de qualidade, o factor de des-sintonização e as necessidades de compensação de potência reactiva da instalação, pode iniciar-se o projecto dos filtros a instalar. De referir que no caso de ser necessário instalar vários filtros, o projecto de cada unidade não pode ser totalmente desacoplado do projecto das restantes unidades, conforme iremos verificar.

3.8.1 Cálculo dos componentes do filtro

Análise preliminar do problema

Sabendo que o factor de qualidade $Q = X_0 / R$ então podemos calcular o valor da capacidade C e da indutância L, desde que a resistência esteja definida:

$$\boxed{C = \frac{1}{\omega_h RQ}} \qquad \boxed{L = \frac{RQ}{\omega_h}} \qquad \textbf{(3.15)}$$

Se o valor da resistência não for contudo definido inicialmente, pode-se estimar um valor para a resistência própria da bobina e resolver o problema adoptando um processo iterativo, em que a pós conhecido o novo valor de L se conhece um valor mais próximo de R e assim sucessivamente até que as diferenças de iteração para iteração não sejam relevantes.

O valor da resistência pode, no entanto, ser calculada a partir da redução da tensão harmónica desejável no barramento onde se irá instalar o filtro sob projecto. Assim, num barramento em que o módulo da tensão harmónica U_h é calculada como,

$$U_h = \frac{I_h}{Y_{hrede}} \tag{3.16}$$

(em que Y_{hrede} é o módulo da admitância equivalente da rede vista desse ponto para o harmónico de ordem h e I_h a correspondente corrente harmónica equivalente), após a instalação do filtro o módulo da tensão nesse ponto, será dada, de acordo com a figura 15, por:

$$U'_h = \frac{I_h}{(Y_{hrede} + Y_{hfiltro})} \tag{3.17}$$

onde Y_{filtro} será a admitância do filtro.

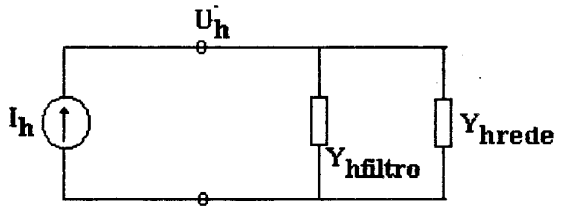


FIgura 15 - Esquema equivalente da rede à frequência hω

Desta forma, definindo á partida a relação do quociente entre U_h e U'_h é possível determinar o valor necessário para a admitância do filtro ($Y_{hfiltro}$) que assim conduz à redução de tensão harmónica pretendida.

Por outro lado, sabendo que a impedância do filtro $Z_{hefiltro}$ à frequência de sintonia efectiva é dada pela expressão

$$\underline{Z}_{hefiltro} = R + j(\omega_{he}L - \frac{1}{\omega_{he}C})$$

e atendendo às equações (3.14) e (3.15), podemos escrever

$$\underline{Z}_{hefiltro} = R + j(\omega_h(1+\delta)\frac{RQ}{\omega_h} - \frac{1}{\omega_h(1+\delta)}\omega_h RQ)$$

o que após algumas simplificações conduz a:

$$\underline{Z}_{hefiltro} = R(1 + jQ\delta(\frac{2+\delta}{1+\delta})).$$

Considerando o factor de des-sintonização (δ) como pequeno, o que é perfeitamente razoável, teremos que a relação

$$\frac{2+\delta}{1+\delta} \cong 2$$

O que permite escrever

$$\underline{Z}_{hefiltro} \cong R(1+j2Q\delta)$$

$$\underline{Y}_{hefiltro} \cong \frac{1}{R(1+j2Q\delta)}$$

Assim, tendo em conta as relações (3.16) e (3.17) e a redução da tensão harmónica pretendida, o que nos permite estimar $Y_{hefiltro}$, é possível calcular então o valor da resistência R do filtro.

Minimização da distorção harmónica da tensão

Para minimizar a distorção harmónica da tensão interessa aumentar a admitância do filtro. Contudo, este aumento deve ser guiado por uma análise criteriosa que a seguir se descreve.

Relembrando que a admitância do filtro se pode escrever como

$$\underline{Y}_{hefiltro} = \frac{1}{R(1+j2Q\delta)} = G + jB$$

$$= \frac{R(1-j2Q\delta)}{[R(1+j2Q\delta)][R(1-j2Q\delta]}$$

$$= \frac{R}{R^2(1+4Q^2\delta^2)} - j\frac{2QR\delta}{R^2(1+4Q^2\delta^2)}$$

Atendendo a que $Q = X_0 / R$, então pode-se exprimir a condutância e susceptância do filtro por:

$$G = \frac{Q}{X_0(1+4Q^2\delta^2)} \qquad \text{e} \qquad B = -\frac{2\delta Q^2}{X_0(1+4\delta^2Q^2)}$$

Se a admitância da rede para o harmónico de ordem h for nula, $\underline{Y}_{hrede} = 0$, a tensão harmónica de ordem h assume o valor definido na expressão (3.18)

$$\underline{U}_h = \frac{\underline{I}_h}{\underline{Y}_{hefiltro}} \tag{3.18}$$

Então, se o factor de des-sintonização aumentar a distorção harmónica aumenta. Desta forma, no dimensionamento do filtro deve procurar-se adoptar o maior factor de des-sintonização para assim avaliar a maior tensão U_h que pode aparecer no barramento sob estudo.

Neste dimensionamento é também necessário proceder a uma análise da forma como a rede, ou melhor a sua admitância equivalente, influência o valor da tensão harmónica.

Assim, sendo $Y_{hrede} \neq 0$, o que corresponde ao caso geral, temos conforme já referido que:

$$\underline{U'}_h = \frac{\underline{I}_h}{(\underline{Y}_{hrede} + \underline{Y}_{hefiltro})}$$

Assim, se Y_{hrede} diminuir a tensão U'_h diminui. Donde devemos concluir que no processo de determinação da admitância óptima do filtro se deve usar o menor valor da admitância equivalente da rede à frequência fh. Assim, ficam definidas as condições mais desfavoráveis de dimensionamento e que devem ser adoptadas no projecto do filtro a instalar.

Sendo $\underline{Y}_{hrede} = 1/\underline{Z}_{hrede}$, com $\underline{Z}_{hrede} = R + jX_{hrede} = Z_{hrede} \angle\Phi$, podemos escrever:

$$\underline{Y}_{hrede} = \frac{1}{Z_{hrede}\angle\Phi} = \frac{1}{Z_{hrede}}\angle -\Phi = Y_{hrede}\cos\Phi - jY_{hrede}sen\Phi$$

Então pode-se calcular a tensão harmónica de ordem **h** no barramento como:

$$\underline{U}_h = \frac{\underline{I}_h}{((Y_{hrede}\cos\Phi + Q/(X_0(1+4Q^2\delta^2)) + j(-2\delta Q^2/(X_0(1+4Q^2\delta^2)) - Y_{hrede}sen\Phi))}$$

Em módulo pode-se escrever que a tensão harmónica de ordem h é dada por:

$$U_h = \frac{I_h}{\sqrt{(Y_{hrede}\cos\Phi + Q/(X_0(1+4Q^2\delta^2)))^2 + (-2\delta Q^2/(X_0(1+4Q^2\delta^2)) - Y_{hrede}sen\Phi)^2}}$$

Podemos então calcular o módulo da admitância Y_{hrede}, que maximiza a tensão harmónica de ordem h, através da maximização do denominador da expressão anterior. Fazendo o radical da raiz igual a uma variável auxiliar **A**, pode-se escrever:

$$\frac{\partial\, 1/\sqrt{A}}{\partial Y_{hrede}} = 0$$

$$\frac{\partial\, 1/\sqrt{A}}{\partial Y_{hrede}} = -\frac{1}{2}A^{-3/2}\frac{\partial A}{\partial Y_{hrede}} = 0$$

Desenvolvendo a derivada teremos:

$$\frac{\partial A}{\partial Y_{hrede}} = 2Y_{hrede}\cos^2\Phi + 2Y_{hrede}sen^2\Phi + \frac{2\cos\Phi Q}{(X_0(1+4Q^2\delta^2))} - \frac{4\delta Q^2 sen\Phi}{(X_0(1+4Q^2\delta^2))}$$

Donde resulta que o módulo da admitância da rede que maximiza a tensão U'_h é dada pela expressão (3.19) que a seguir se descreve.

$$Y_{hrede} = \frac{Q(-2\delta Q tg\Phi - 1)\cos\phi}{X_0(1+4Q^2\delta^2)} \tag{3.19}$$

Relembrando que a tensão neste barramento para o harmónico de ordem h, $\underline{U}'_h$, é dada por

$$\underline{U'}_h = \frac{\underline{I}_h}{\underline{Y}_{hrede} + \underline{Y}_{hefiltro}}$$

Então o máximo módulo da tensão $\underline{U}'_h$, para as piores condições da rede, pode ser dado pela expressão (3.20) a seguir representada.

$$U_h = I_h \delta\omega_h L\left(\frac{1+4Q^2\delta^2}{Q(sen\Phi + 2Q\delta\cos\Phi)}\right) \tag{3.20}$$

O dimensionamento do filtro ficará optimizado se procurarmos então minimizar a tensão U'_h, tomando agora em consideração a admitância do filtro. Fazendo o quociente da expressão anterior igual a B, a menor tensão de U'_h pode ser calculada através da maximização deste parametro auxiliar. Para tal procede-se assim ao cálculo da derivada de B relativamente ao factor de qualidade do filtro e procura-se resolver a equação seguinte:

$$\frac{\partial B}{\partial Q} = 0$$

Da resolução desta equação obtém-se a seguinte expressão para Q:

$$Q = \frac{1+\cos\Phi}{2\delta sen\Phi} \tag{2.21}$$

para $\Phi = 90°$ teremos ainda

$$Q = \frac{1}{2\delta}$$

Por outro lado, pretende-se também que o factor de qualidade seja grande para, desta forma, se proceder à redução das perdas no filtro. Assim, para Q dado pela expressão (2.21) é facil de verificar que o módulo da tensão, no barramento onde for instalado o filtro, será dado pela seguinte expressão:

$$U'_h = I_h \delta\omega_h L\left(\frac{4}{1+\cos\Phi}\right)$$

3.8.2 - Avaliação de outros parâmetros no dimensionamento de um filtro

O dimensionamento de um filtro não se limita, contudo, ao cálculo dos elementos constituintes do filtro (RLC), tendo em conta apenas questões ligadas com a necessidade de grande atenuação de um harmónico e de minimização global da distorção harmónica num dado barramento. Outros factores devem ser considerados, nomeadamente:

- potência reactiva produzida pelo filtro;
- tensão aplicada sobre os terminais dos condensadores;
- potência dissipada nos componentes resistivos do filtro.

A potência reactiva individual a 50 Hz produzida por cada unidada monofásica de um filtro, S, pode ser calculada por:

$$S = \frac{U_s^2}{Xc - XL}$$

Sendo U_S a tensão simples da rede e Xc e XL respectivamente as reactâncias capacitiva e indutiva da rede à frequência fundamental.

A tensão (50 Hz) aplicada sobre a componente capacitiva do filtro, $\underline{U}_C$, é calculada por:

$$\underline{U}_C = -jXc\,\underline{I}_1 = \frac{-jXc}{-jXc + jXL + R}\underline{U}_S$$

Para um filtro ideal (sem componente resistiva), e tendo em conta as relações entre Xc e XL para o filtro sintonizado para o harmónico h, é fácil de demonstrar que a tensão aplicada sobre o condensador pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$U_c = \frac{h^2}{h^2 - 1}U_s$$

Considerando a presença do harmónico h, a tensão total efectivamente aplicada sobre a capacidade pode ser calculada através da soma aritmética da componente fundamental da queda de tensão em XC com a queda de tensão para o harmónico h:

$$U_c = I_1 Xc + I_h Xc_h$$

Sendo I_h o valor da corrente veiculada através do filtro para o harmónico h e Xch o valor da reactância capacitiva para o mesmo harmónico.

A potência dissipada nos componentes resistivos de cada unidade de um filtro trifásico, Pr, é por seu lado, calculada atendendo à componente fundamental e ao harmónico h a atenuar, pela expressão

$$\mathrm{Pr} = \frac{RS^2}{U_s^2} + \frac{U_h^2}{R}$$

De referir que frequentemente se recorre a baterias de condensadores já existentes, utilizadas na compensação do factor de potência de instalações industriais, para proceder simultaneamente à filtragem de harmónicos indesejáveis. A figura 16 apresenta o esquema unifilar de uma instalação industrial de grande potência onde baterias de 2 e 4 MVAr são utilizadas para respectivamente filtrarem o 13° e o 11° harmónico.

A instalação da figura 16 é uma instalação real de uma fábrica de produtos químicos alimentada a 60 kV a partir de uma subestação da rede primária. Nesta figura é ainda possível observar a presença de equipamentos de protecção contra sobretensões.

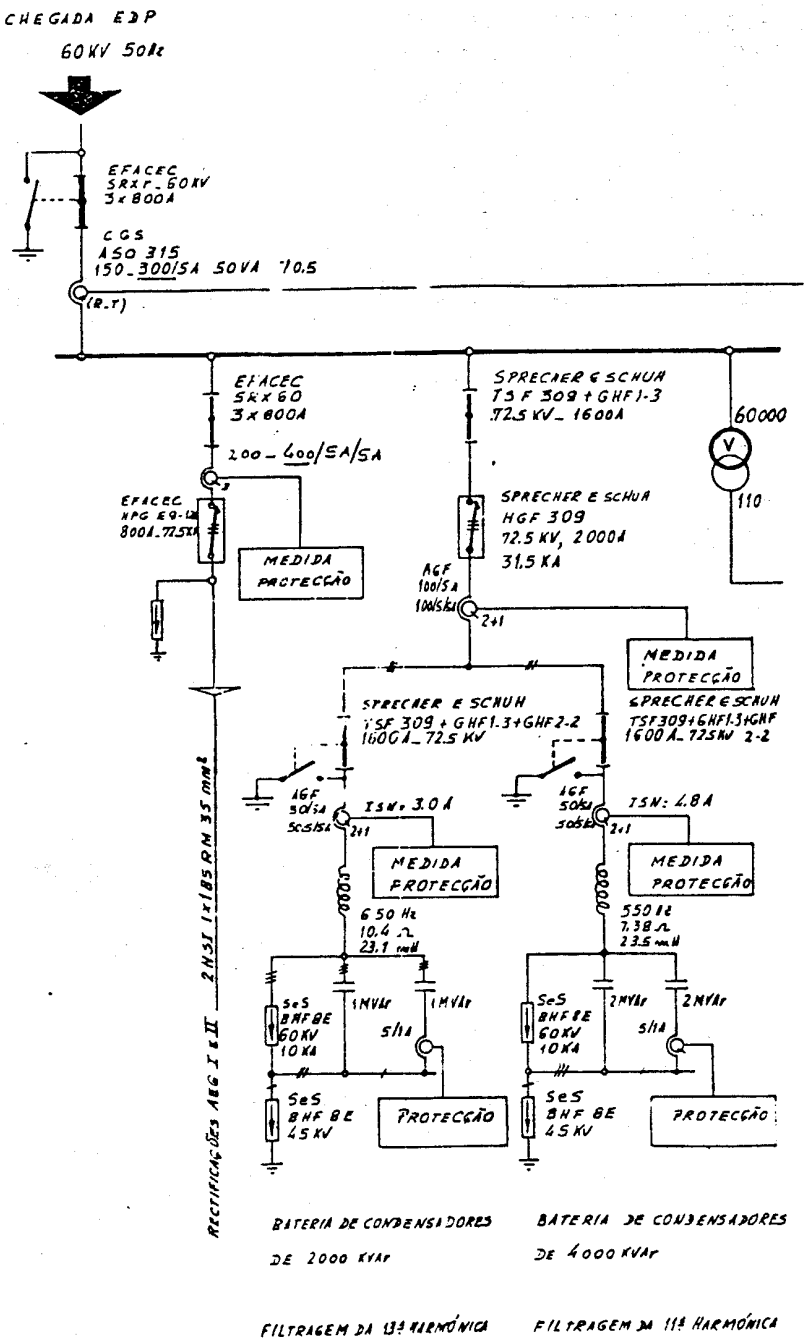


Figura 16 - Esquema unifilar de filtros de uma instalação industrial

Aconselha-se ainda que, aquando do dimensionamento de um filtro com vários andares, se proceda ao traçado da resposta em frequência do conjunto. A figura 17 apresenta o traçado típico da resposta em frequência associada ao módulo da impedância total do filtro para uma situação destas. A partir de uma análise desta resposta em frequência, que pode também incluir um equivalente da rede, é possível avaliar o comportamento global do filtro e proceder a eventuais afinações nos parâmetros dos elementos que constituem cada andar.

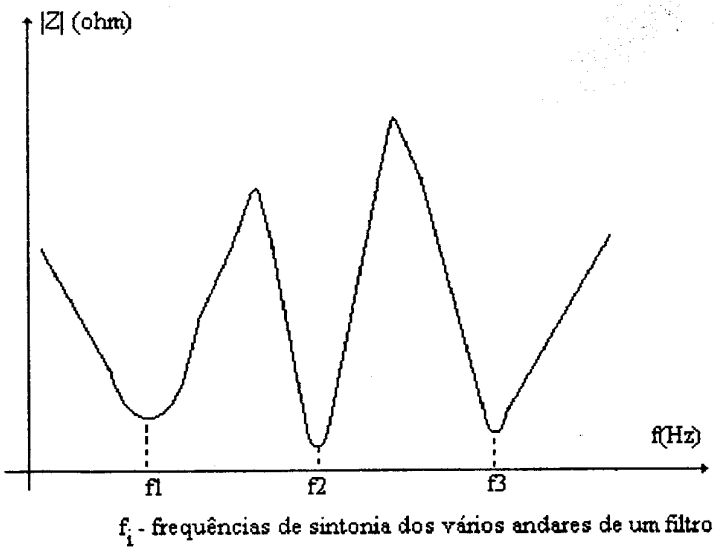


Figura 17 - Resposta em frequência de um filtro com vários andares.

Podem também ser traçada a resposta em frequência da fase do filtro de uma forma semelhante à representada nesta figura.

3.8.3 - Penetração harmónica em redes

Conhecidos os pontos de uma rede responsáveis pela injecção de harmónicos e sabendo o valor das correntes harmónicas injectadas. é possível avaliar a penetração da poluição harmónica nessa rede resolvendo um problema de trânsito de harmónicos.

A resolução do trânsito de harmónicos permite calcular as tensões harmónicas em cada barramento e, desta forma, conhecer de seguida o valor das correntes harmónicas nos ramos da instalação.

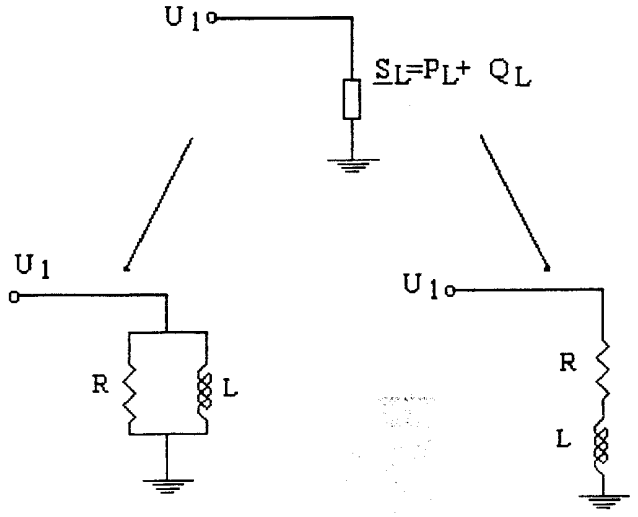
Este tipo de estudos é bastante complexo, exigindo uma modelização bastante rigorosa dos componentes e do sistema e um conhecimento detalhada do valor das correntes injectadas nos nós poluidores. Contudo, é possível avaliar a penetração harmónica na rede recorrendo a modelos simplificados dos componentes, nomeadamente efectuado análises monofásicas do problema. A primeira etapa necessária para a realização destes estudos consiste em:

- Determinação de modelos dos componentes do sistema (Linhas, Transformadores);
- Determinação de modelos para as cargas.

Os modelos adoptados para as linhas e cabos consistem na adopção dos modelos em π, com as necessárias modificações dos parâmetros eléctricos para os harmónicos sob análise, podendo incluir ou não a acção do efeito pelicular no valor da resistência equivalente do ramo.

Para as cargas os modelos a adoptar podem, de igual forma, ser trifásicos ou monofásicos, adoptando-se contudo neste documento apenas representações do tipo monofásico. A figura 18 apresenta dois modelos possíveis para cargas industriais. Outros modelos podem ser adoptados, apresentando a literatura da especialidade várias opções para esta representação.

De referir que no caso de se pretender incluir modelos de motores de indução neste tipo de análises, pode-se adoptar uma modelização semelhante à utilizada nos estudos realizados para frequências industriais.



$$R = \frac{U_1^2}{P_L} \qquad R = \frac{U_1^2 P_L}{P_L^2 + Q_L^2}$$

$$L = \frac{U_1^2}{2\pi 50 Q_L} \qquad L = \frac{U_1^2 Q_L}{2\pi 50 (P_L^2 + Q_L^2)}$$

Figura 18 - Modelos de cargas para estudos de trânsito de harmónicos

Métodos de análise

Existem fundamentalmente três abordagens possíveis, descritas na literatura, para resolver o problema do trânsito de harmónicos monofásico. São estas:

- Método de Newton Raphson (Exige o conhecimento das potências harmónicas geradas);
- Método da matriz das admitâncias;
- Método dos coeficientes de transferência;
- Método da matriz das impedâncias.

Método das admitâncias

Desenvolve-se de seguida com um pouco de detalhe o método da matriz das admitâncias por ser de fácil tratamento matemático e facilmente programável, podendo portanto ser utilizado para avaliar numa primeira etapa a penetração harmónica em redes industriais num mesmo nível de tensão. Este método utiliza a mesma formulação adoptada no estabelecimento das equações fundamentais do problema do trânsito de potências clássico à frequência fundamental. Assim a equação matricial fundamental deste método para uma rede com **m** barramentos é que se apresenta seguidamente:

$$[\underline{I}_h] = [\underline{Y}_h][\underline{U}_h] \tag{2.22}$$

onde

$[\underline{I}_h] = [I_{1h}, I_{2h}, I_{3h}, \ldots, I_{mh}]^T$ - Vector das correntes harmónicas injectadas nos i barramentos para o harmónico de ordem h;

$[\underline{U}_h] = [\underline{U}_{1h}, \underline{U}_{2h}, \underline{U}_{3h}, \ldots, \underline{U}_{mh}]^T$ - Vector das tensões nos nós da rede para o harmónico de ordem h;

$$[\underline{Y}_h] = \begin{bmatrix} Y_{11h} & \cdots & Y_{1mh} \\ . & . & . \\ Y_{m1h} & \cdots & Y_{mmh} \end{bmatrix}$$ - Matriz das admitâncias do sistema para o harmónico de ordem h

Esta matriz admitância $[\underline{Y}_h]$ pode ser construída seguindo um procedimento igual ao que se utiliza para a construção da matriz admitâncial nodal à frequência industrial.

O método de análise passa pois pela resolução da equação matricial (2.22), relativamente ao vector das tensões nodais, tanta vezes quantos os harmónicos que se pretendem considerar na análise. O algoritmo deste método pode ser facilmente representado no fluxograma que a seguir se descreve na figura 19. Os dados a introduzir devem ser os seguintes:

- Parâmetros eléctricos dos ramos (R, L, C) de acordo com o modelo em π;
- Consumos das cargas da rede (PL e QL);
- Correntes harmónicas injectadas e barramentos de injecção.

A resolução do fluxo de cargas inicial permite conhecer o valor das tensões nodais à frequência industrial, sendo seguidamente possível determinar os modelos equivalentes para as impedâncias das cargas que assim são incluídas na diagonal da matriz admitância nodal adoptando o procedimento usual para estes casos.

Os resultados obtidos permitem uma análise da penetração harmónica na rede através dos seguintes valores:

- o valor de todos os harmónicos das tensões em todos os barramentos da rede
- o valor de todos os harmónicos das correntes em todos os ramos.

De sublinhar que a abordagem e o algoritmo descrito apenas permitem estudos unifiliares em sistemas supostos equilibrados. A existência de acoplamentos indutivos e capacitivos entre fases, que se manifestam especialmente nas altas frequências, bem como desequilíbrios na injecção de correntes harmónicas, que frequentemente se verificam em situações reais, não podem ser tratadas com esta abordagem.

Este método exige um significativo esforço de cálculo dado ser necessário construir e inverter a matriz admitância nodal (com valores complexos) tantas vezes quantos os harmónicos que são considerados na análise que se pretende realizar. Tal resulta do facto de para cada frequência sob análise os parâmetros eléctricos (reactâncias indutivas - XL_h e susceptâncias capacitivas- $\underline{Yc}_h$) do modelo em π de cada ramo variarem conforme se relembra:

$$XL_h = 100\pi hL \qquad \underline{Yc}_h = j100\pi\frac{C}{2}$$

Por outro lado, para as altas frequências convém também incluir aumentos no valor da resistência dos condutores dos ramos devido à influência do efeito pelicular [1].

---

[1] - Uma descrição mais desenvolvida destes problemas pode ser encontrada no livro de Arrillaga et al. "Power System Harmonics", John Wiley and Sons, 1985.

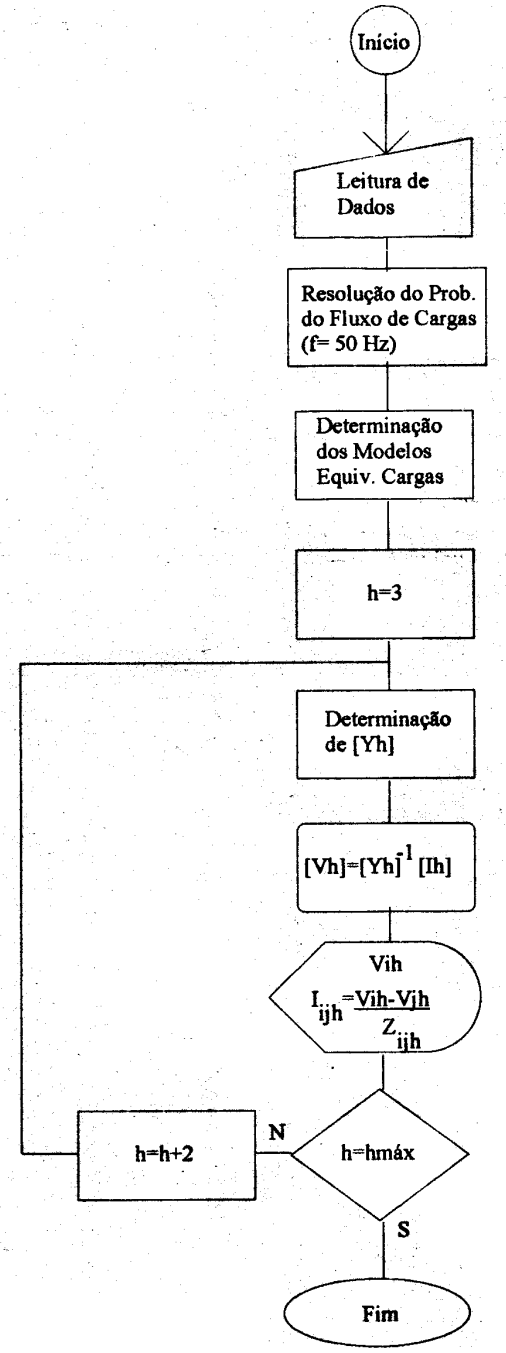


Figura 19 - Fluxograma associado ao algoritmo do método das impedâncias

Obviamente nas redes onde se sabe que existem desequilíbrios significativos nas correntes injectadas por fase, desequilíbrios nos valores dos parâmetros eléctricos de cada ramo e quando os acoplamentos indutivos e capacitivos entre fases são elevados recomenda-se uma análise trifásica do problema. A metodologia a adoptar passa então pela utilização de modelos trifásicos dos componentes. Nesta situação o problema assume uma dimensão bastante elevada, aparecendo problemas de armazenamento da matriz admitância total e problemas numéricos acrescidos na resolução do problema (1).

Relembre-se que uma linha ou um cabo de uma rede exige, numa representação trifásica, uma matriz admitância de dimensão 6 x 6. A situação complica-se quando na rede sob análise se pretendem incluir

transformadores e considerar o seu tipo de enrolamentos. De referir que, quando se pretende avaliar a penetração harmónica numa rede com vários niveis de tensão, se torna indispensável uma análise trifásica do problema para obter resultados correctos, devido precisamente à presença dos transformadores.

O problema do trânsito de harmónicos em redes, nomeadamente em redes de transporte e quando existem interligações AC/DC, envolve uma complexidade superior, exigindo métodos de análise mais sofisticados. Contudo, o seu tratamento excede os objectivos deste texto e deste capítulo, destinado a fornecer indicações para a compreensão, análise e tratamento de problemas de poluição harmónica em redes industriais.

Outras abordagens existem para avaliar a penetração harmónica em redes, nomeadamente as baseadas em metodologias probabilisticas. Neste métodos o objectivo consiste em determinar as funções de distribuição de probabilidade das tensões nos barramentos do sistema como resultado de uma injecção aleatória de correntes harmónicas em barramentos onde se situam cargas não lineares.

De entre as abordagens desenvolvidas podemos citar:

- Aplicação do método de Monte Carlo;
- Aplicação de uma metodologia baseada no tratamento analítico de funções de distribuição normal.

Esta área proporciona bastantes temas para investigação, estando a ser desenvolvidas aplicações de outras técnicas nestes domínios.

4. OCOS DE TENSÃO E MICRO CORTES

4.1 Introdução

Os ocos de tensão de tensão e os micro-cortes são perturbações que ocorre frequentemente nas redes eléctricas e que podem provocar graves problemas a um processo industrial. Estes problemas têm como causas possíveis as seguintes:

- curto-circuitos na rede;
- comutação automática de fontes de alimentação na sequência de um defeito no circuito inicial;
- transferência de cargas de uma fonte para outra;
- defeitos fugitivos em redes radiais eliminados após reengate automático.

Estas perturbações acarretam graves problemas para o funcionamento de uma unidade industrial, não se limitando ao período reduzido em que têm lugar. A eventual paragem de processos industriais acarreta problemas bastante mais graves, dada a possibilidade de destruição dos produtos em curso de fabrico e/ou a necessidade de reiniciar sequências de produção que podem envolver processos demorados e complexos. Nestas situação os prejuízos técnicos e económicos nas unidades industriais podem ser extremamente graves.

De entre as principais consequências destas perturbações podemos indicar:

- paragem momentânea de motores;
- paragem de processos industriais comandados por computador por perda informação e comunicação;
- perdas de informação em equipamentos informáticos.

A título de exemplo indicam-se seguidamente alguns problemas que podem ocorrer em unidades industriais na sequência de ocos de tensão ou micro-cortes no sistema de energia:

- Em complexos petroquímicos a paragem de motores associados a processos fabris acarreta a paragem do processo;
- Em unidades siderúrgicas a interrupção da ventilação de altos fornos pode provocar graves problemas;
- Em fábricas em que estejam envolvidos processos de extrusão de materiais plásticos a perda de alimentação de energia pode provocar a paragem dos motores de arrasto dos produtos o que levar à destruição de uma encomenda e exigir o reinício do processo.

4.2 - Parâmetros Característicos dos Ocos de Tensão

Embora caracterizadas por uma irregularidade relativamente à sua periodicidade e apesar de não existirem critérios de admissibilidade fixados genericamente, torna necessário avaliar estas perturbações recorrendo a medições a efectuar junto das unidades industriais. Por vezes este tipo de problemas surge com uma frequência superior à desejada, devido a deficiências estruturais das redes locais de alimentação de energia, pelo que se instalam equipamentos de medida e registo destinados a avaliar este tipo de perturbações. Estes equipamentos são por vezes designados de qualímetros.

Os parâmetros utilizados para efectuar esta avaliação são os seguintes:

A - <u>Profundidade do oco de tensão</u> (%)

$$\Delta U = \frac{U_r}{U_N}$$

onde:
Ur - valor da tensão residual de defeito no barramento sob análise;
U_N - tensão nominal da rede nesse barramento.

A profundidade de uma queda de tensão pode atingir os 100 % no local de um c.c., nomeadamente no caso de um defeito franco. Num ponto intermédio de uma rede radial, ponto A, a tensão residual Ur pode ser calculada a partir do conhecimento das impedâncias da rede, da forma que se indica na figura 20.

$$U_r(\%) \approx \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

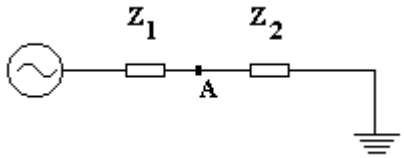


Figura 20 - Cálculo aproximado da tensão residual de defeito numa rede radial

B - Duração da perturbação (s)

A duração da perturbação está associada ao período de tempo em que esta decorre e está geralmente ligada com o tempo de eliminação do defeito que lhe dá origem. Os tempos típicos destas perturbações são os indicados a seguir:

Tempos de eliminação típicos (s)	Tipo de Rede
0.1	Rede de Transporte
0.3 a 0.5	Redes MT e BT

C - Número de fases afectadas

A situação mais frequente consiste em apenas uma das fases ser afectada pelo micro-corte ou oco de tensão ficando as outras sem grande perturbação. No caso de na origem desta situação estar um c.c. na rede, tal depende obviamente do tipo de defeito que ocorreu. Por outro lado o tipo de regime de neutro da rede é também responsável pela forma como se manifesta a perturbação.

De referir que numa rede com neutro isolado um defeito monofásico à terra não constituí um c.c., apenas provocando um deslocamento do ponto de neutro.

Os transformadores e o tipo de ligações existentes influem também na forma como um c.c. se repercute no valor da tensão residual de defeito e nas fases afectadas. Assim em transformadores MT/BT com enrolamentos triângulo/estrela, um defeito que ocorra do lado de BT afectará 2 fases da MT embora de uma forma atenuada.

4.3 - Comportamento de Motores Assíncronos

Conforme já se referiu, um dos problemas mais graves para uma instalação industrial consiste na eventual paragem de motores assíncronos. Assim desenvolve-se seguidamente este tema, analisando fundamentalmente o comportamento dinâmico destas máquinas na sequência da perturbação, atendendo a que este aspecto é determinante para avaliar as hipóteses de paragem do motor na sequência de ocos de tensão ou micro-cortes.

A figura 21 apresenta a curva típica do binário motor de um motor assíncrono (Cm) em função do seu deslizamento - g, sendo esta grandeza definida por:

$$g = \frac{\omega_S - \omega}{\omega_S}$$

onde:
ω_S - velocidade de sincronismo do motor;
ω - velocidade instantânea do motor.

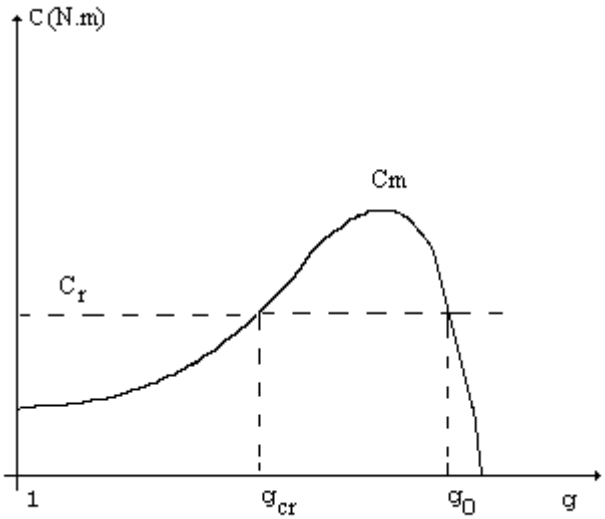


Figura 21 - Diagrama típico de binários em função de deslizamento para um motor assíncrono (Cm) acoplado a um compressor (curva de binário Cr).

Nesta figura estão assinalados o deslizamento inicial (g_0) e o deslizamento crítico (g_{cr}) correspondente ao deslizamento resultante da intersecção do ramo instável da curva de binário motor Cm com a curva de binário resistente C_r.

Neste caso a condição de estabilidade do motor é a seguinte:

A queda de velocidade que se verifica durante a ocorrência de um oco de tensão não pode levar a que o deslizamento da máquina ultrapasse o valor do deslizamento crítico g_{cr}.

Com efeito, a ocorrência de um micro-corte ou de um oco de tensão leva à diminuição do binário motor, podendo ter lugar duas situações:

a) o binário motor apresenta um valor máximo superior ao binário resistente, ficando neste caso o motor a funcionar num novo ponto de equilíbrio;
b) o binário motor tem um valor máximo inferior ao binário resistente dando-se uma rápida diminuição da velocidade da máquina, podendo ultrapassar g_{cr}.

A evolução temporal do processo de frenagem é condicionada pela equação do movimento das máquinas girantes. Assim teremos:

$$I\frac{d\omega/p}{dt} = C_m(g,U_r) - C_r$$

$$\frac{I}{p}\frac{d\omega}{dt} = C_m(g,U_r) - C_r \qquad (4.1)$$

onde:

p - número de pares de pólos do motor;
I - momento de inércia da máquina (kg.m^2);
ω - velocidade eléctrica angular (rad/s).

A verificação da condição de estabilidade exige a integração da equação (4.1), a qual pode ser efectuada:

- - analiticamente (aproximando a característica Cm(g,U_r) a segmentos lineares;
- - numericamente (obtendo-se assim resultados mais fiáveis).

Esta resolução no domínio do tempo da equação diferencial (4.1), conjugada com a condição de estabilidade anteriormente descrita, conduz a à noção de tempo crítico do micro-corte ou oco de tensão. Este tempo

crítico pode ser definido como o tempo máximo que a perturbação na tensão pode persistir sem que o motor pare, admitindo que a tensão da rede retoma os seus valores nominais após do desaparecimento da perturbação. De referir, que este conceito está relacionado com a estabilidade transitória dos geradores de um sistema de energia, conforme se verá em outras disciplinas.

Vejamos o seguinte caso correspondente a uma situação bastante desfavorável. Se admitirmos a ocorrência de um curto-circuito tripolar na rede, todas a tensões ficarão igualmente afectadas e a característica de binário motor para a tensão residual U_r pode exprimir-se por:

$$C_m(g,U_r)=(\frac{U_r}{U_N})^2 C_m(g,U_N) \tag{4.2}$$

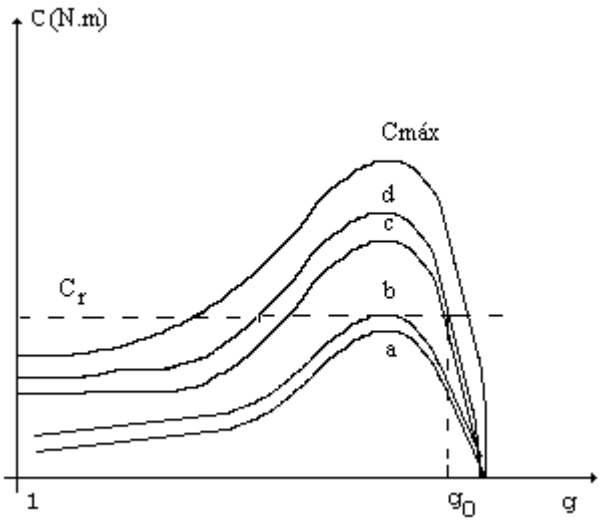


Figura 22 - Curvas de binário motor para diferentes tensões aplicadas ao motor assíncrono.

A situação correspondente à curva b) está associada a uma tensão residual crítica U_{rc}, definida pela relação seguinte**

$$(\frac{U^2 rc}{U^2 N})=\frac{C_r}{C_{máx}}$$

onde Cmáx é o binário máximo desenvolvido pela máquina á tensão nominal U_N.

A figura 23 apresenta, a título de exemplo, uma determinação gráfica dos tempos críticos de eliminação de defeitos na rede para diversos valores de tensões residuais de defeito no barramento onde se encontra ligado o motor sob estudo.

A figura 24 apresenta, por sua vez, a evolução dos valores admissíveis para a tensão residual no barramento onde o motor se encontra instalado, após a ocorrência de um defeito, em função do tempo crítico de eliminação da perturbação.

** - O binário motor desenvolvido por um motor assíncrono depende do quadrado da tensão aplicada aos terminais da máquina. Recomenda-se a leitura de apontamentos ou textos de máquinas eléctricas para rever estes conceitos.

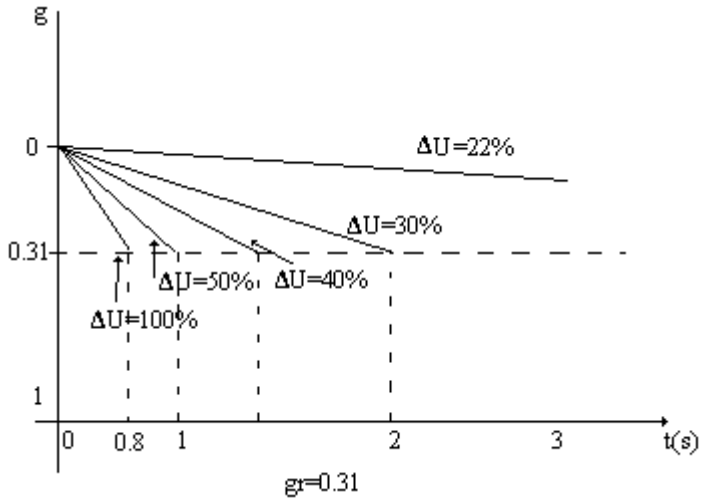


Figura 23 - Determinação gráfica de tempos críticos de eliminação de defeitos

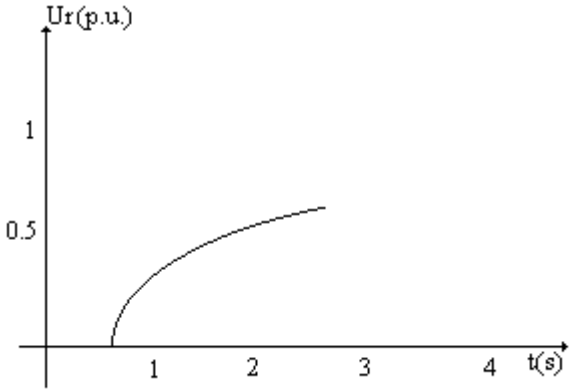


Figura 24 - Tensão residual em função do tempo crítico do oco de tensão

No caso de termos um c.c. trifásico franco junto do motor a tensão residual é nula pelo que o binário motor também se anula. Desta forma podemos escrever:

$$I/p\frac{d\omega}{dt} = -C_r$$

$$dt = -\frac{I}{C_r p}d\omega$$

atendendo a que $g = 1 - \frac{\omega}{\omega_s}$ então

$$dg = -\frac{1}{\omega_s}d\omega$$

pelo que

$$dt = \frac{I\omega_s}{pC_r}dg \qquad (4.3)$$

Finalmente pode-se determinar o valor do tempo crítico de eliminação do oco de tensão para um defeito franco através da integração da equação (4.3), entre o deslizamento inicial g_0 e e o deslizamento crítico g_{cr}, conforme a seguir se descreve

$$t_{cr} = \frac{I\omega_s}{pC_r}\int_{g0}^{gcr} dg \qquad (4.4)$$

$$t_{cr} = \frac{I\omega_s}{pC_r}(g_{cr} - g_0) \quad \text{.....(4.5)}$$

Quando a tensão da rede não se anula ($U_r \neq 0$) é necessário resolver a equação diferencial (4.1). Para tal pode-se adoptar uma abordagem baseada no modelo equivalente simplificado de 1ª ordem da máquina assíncrona conforme o que a seguir se descreve.

Assim, recorde-se que o esquema equivalente da máquina assíncrona é o representado na figura 25, onde R1 e R2 são respectivamente a resistência estatórica e rotórica e X1 e X2 são a reactância estatórica e rotórica. A reactância de magnetização Xm está também incluída neste modelo.

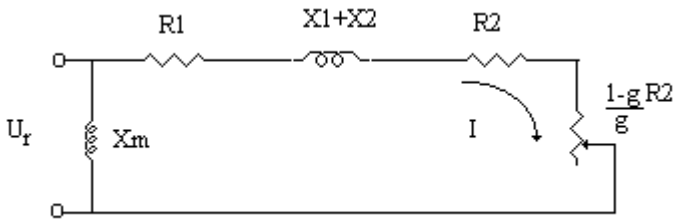


Figura 25 - Esquema unifilar equivalente do motor assíncrono

A partir deste circuito a potência mecânica desenvolvida (P_m) é calculada através da potência dissipada na resistência R2(1-g)/g. Assim teremos:

$$P_m = 3\frac{(1-g)}{g}R_2 I^2$$

$$P_m = 3\frac{(1-g)}{g}R_2 \frac{U_r^2}{(R_1 + \frac{R_2}{g})^2 + X^2} \quad (4.6)$$

Onde X=X1+X2. Relembrando ainda que o binário desenvolvido T pode ser calculado a partir do quociente entre a potência mecânica entregue pela máquina e a velocidade angular efectiva (ω_r), é possível escrever:

$$T = \frac{p}{\omega_s(1-g)}P_m \quad (4.7)$$

atendendo a que

$$\omega = (1-g)\omega_s \quad \text{e} \quad \omega_r = \frac{\omega}{p} = \frac{(1-g)}{p}\omega_s$$

Desenvolvendo a expressão (4.7) utilizando (4.6) chega-se a:

$$T = \frac{p}{\omega_s}\frac{3R_2}{g}\frac{U_r^2}{(R_1 + \frac{R_2}{g})^2 + X^2}$$

A equação diferencial (4.1) assume então a seguinte forma:

$$\frac{I}{p}\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{\omega_s}\frac{3R_2}{g}\frac{U_r^2}{(R_1 + \frac{R_2}{g})^2 + X^2} - C_r \quad (4.8)$$

A resolução desta equação exige métodos numéricos dado tratar-se de uma equação diferencial não-linear. Repare-se que o deslizamento g depende de ω (grandeza a ser integrada ao longo do tempo). Para além

disto, pode também acontecer que num sistema de energia o valor da tensão residual U_r não seja constante ao longo do tempo.

De entre os métodos numéricos utilizáveis para resolver esta equação podemos referir os métodos de Euler (Fácil de implementar mas com baixa fiabilidade), Euler modificado ou Runge-Kutta (assegurando maior precisão numérica).

Por outro lado o binário resistente pode também não ser constante ao longo do período de tempo sob análise, o que acontece frequentemente. Seguidamente aborda-se com um pouco mais de detalhe, na secção seguinte, este problema.

Influência do binário resistente no comportamento do motor

Alguns dos dispositivos que são acoplados aos motores apresentam, contudo, características de binário resistente varáveis com a velocidade. Na figura 26 descreve-se uma destas situações. Obviamente o tratamento numérico deste tipo de casos é mais complexo. Para tal é necessário ou encontrar uma função que represente com qualidade a curva característica do binário resistente ou descretizar essa curva por segmentos lineares.

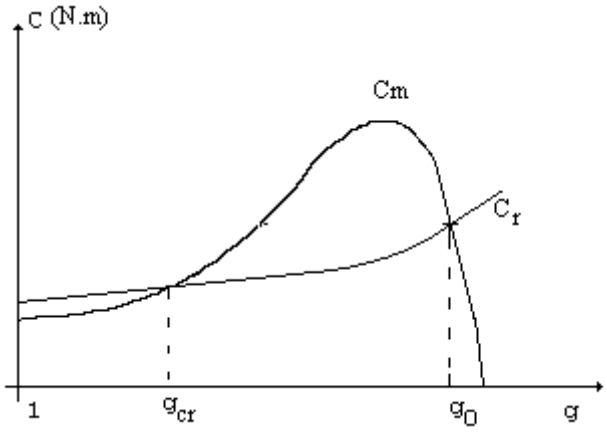


Figura 26 - Característica de binário motor e de uma carga mecânica não linear.

Como se pode observar desta figura o deslizamento crítico desloca-se geralmente para a esquerda, relativamente a uma situação de binário resistente constante de igual valor no ponto de intersecção do ramo direito da curva de binário motor com o binário resistente. Este facto permite concluir que este tipo de cargas conduzem a uma característica de estabilidade melhor, isto é o tempo crítico de desaparecimento do oco de tensão é maior.

5. DESEQUILIBRIO DE TENSÕES

Os desequlibrios de tensão são vulgares nas redes de BT, nomeadamente em instalações industriais onde existem um número significativo de aparelhos monofásicos, cargas monofásicas importantes ou ainda fornos de indução, que assim podem provocar os seguintes principais problemas:

- sobrecargas nos condutores mais "carregados";
- sobre-aquecimentos em máquinas rotativas;
- diminuição da capacidade de transporte das canalizações eléctricas;
- mau funcionamento de sistemas electrónicos de controlo e protecção;
- falhas no funcionamento de rectificadores controlados.

Assim a avaliação do desiquilibrio entre tensões num sistema trifásico determina uma das etapas da avaliação da qualidade da tensão num sistema de energia. Esta avaliação é efectuada recorrendo aos seguintes parâmetros:

- grau de desequilibrio inverso - $u_u = \dfrac{u_i}{u_d}$
- grau de desequilibrio homopolar - $u_h = \dfrac{u_0}{u_d}$

onde u_d - componente directa da tensão;
u_i - componente inversa da tensão,
u_0 - componente homopolar da tensão.

O nível de CEM em BT que é referido em algumas publicações para este tipo de problema apresenta o valor de 2% para o grau de desequlibrio inverso.

O desequilibrio de tensões pode então ser avaliado recorrendo à aplicação da decomposição da tensão trifásica nas suas componentes simétricas. Assim, e recordando, para um sistema trifásico com tensões U_1, U_2, U_3 podemos escrever:

$$\underline{U}_1 = U_d + U_i + U_0$$
$$\underline{U}_2 = \alpha^2 U_d + \alpha U_i + U_0$$
$$\underline{U}_3 = \alpha U_d + \alpha^2 U_i + U_0$$

Então teremos

$$\underline{U}_{12} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2 = U_d(1-\alpha^2) + U_i(1-\alpha)$$
$$\underline{U}_{23} = \underline{U}_2 - \underline{U}_3 = U_d(\alpha^2 - \alpha) + U_i(\alpha - \alpha^2)$$
$$= \alpha(U_d(\alpha - 1) + U_i(1+\alpha))$$
$$\underline{U}_{12} - \frac{\underline{U}_{23}}{\alpha} = -U_d(-2 + \alpha^2 + \alpha)$$

E assim pode-se obter as componentes directa e inversa da tensão como:

$$\boxed{\begin{aligned} U_d &= \frac{\underline{U}_{12} - \underline{U}_{23}\alpha^2}{3} \\ \underline{U}_i &= \frac{\underline{U}_{12} - \underline{U}_{23}\alpha}{3} \end{aligned}}$$

Sendo α o operador definido como $\alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

Então, utilizando equipamentos de medida que exploram a diferença entre as tensões $\underline{U}_{12}$ e $\underline{U}_{23}$ obtêm-se os valores das componentes directas e inversas necessárias para avaliar o desequilibrio de tensões, e para o cálculo do indicador u_u.

Seguindo uma abordagem semelhante à descrita no capítulo 2 deste documento, é possível avaliar a qualidade de tensão na perspectiva dos desequilibrios do sistema trifásico. Recomenda-se nomeadamente a determinação do parâmetro U_{uvs}, correspondente a um conjunto de medidas a efectuar durante o periodo Tvs. este parâmetro é definido como:

$$U_{uvs} = \frac{1}{N}\sqrt{(\Sigma_{k=1}^{N} u_{n,k}^{2}}$$

sendo N o número de medidas efectuadas durante o período de 3 s correspondente ao "very short interval".

Outras avaliações realizadas nos períodos T_{sh}, T_L e T_D, bem como traçados gráficos das evoluções temporais destes indicadores podem também ser utilizados para avaliar a qualidade de tensão nesta vertente.

De entre as medidas que podem ser adoptadas para reduzir este tipo de problemas podem-se mencionar nomeadamente:
- redestribuir de forma mais equilibrada as cargas monofásicas na instalação de utilização;
- utilizar compensadores estáticos (L,C) que procuram compensar os desequlibrios existentes.

6. FLUTUAÇÕES DE TENSÃO - EFEITO "FLICKER"

6.1 Introdução

As flutuações de tensão que conduzem ao efeito "Flicker" consistem em quedas de tensão rápidas provocadas por aparelhos eléctricos que funcionam de forma mais ou menos regular (não necessariamente com a mesma frequência de repetição) e que, desta forma, provocam perturbações em vários receptores do sistema, nomeadamente desconforto na utilização de iluminação artificial.

Os aparelhos que podem provocar este tipo de perturbações são os seguintes:
- Aparelhos de soldadura por arco;
- Fornos de arco;
- Motores com arranque frequente (monta-cargas, bombas, serras eléctricas);
- Moinhos industriais e laminadoras;
- Ventiladores potentes;
- Geradores eólicos.

Na figura 27 apresentam-se exemplo do tipo de flutuações de tensão associadas a este problema.

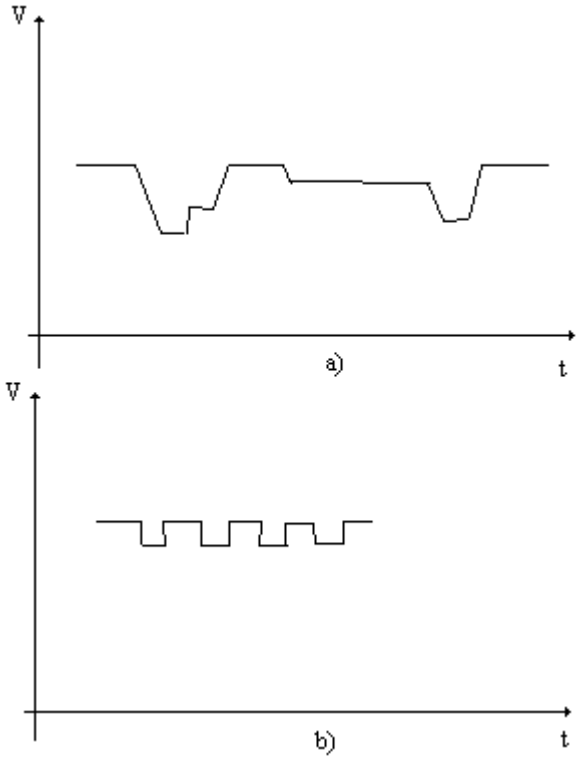


Figura 27 - Flutuações de tensão procando efeito flicker - a) Ventiladores, b) Soldadura por pontos.

A avaliação das perturbações provocadas pelo fenómeno de "flicker" é efectuada atendendo ao grau de incómodo provocado nos utilizadores devido à variação da luminância das armaduras de iluminação. Verificou-se entretanto que este incómodo depende fundamentalmente da frequência de repetição dessas variações.

Foram assim estabelecidas algumas definições para possibilitar o tratamento e análise deste problema. De entre essas mencionamos as seguintes:

- <u>Variação de tensão</u> - Consiste na variação do valor eficaz da tensão entre dois níveis adjacentes, mantendo-se cada um destes durante um tempo superior a 30 ms;

- <u>Amplitude de uma variação de tensão</u> - diferença de dois valores eficazes da tensão resultantes de uma variação de tensão, conforme definida anteriormente;

- Duração de uma variação de tensão - intervalo de tempo durante o qual o valor eficaz da tensão cresce ou decresce de um valor inicial a um valor final;

- Flutuação de tensão - série de variações de tensão ou varaiações ciclicas da envolvente da onde de tensão;

- "Flicker" - impressão mais ou menos subjectiva da flutuação da luminância de fontes luminosas;

- Limite de irritabilidade do "Flicker" - flutuação máxima de luminância que pode ser suportada por uma amostra especificada de população, (Este limite pode ser ainda função da actividade das pessoas e do tamanho e tipo da armadura de iluminação);

- Indice de severidade do Flicker de curta duração (Pst) - indice que permite avaliar a severidade do fenómeno de "flicker" durante curtos periodos de tempo (intervalo base 10 minutos); considera-se que o limite de irritabilidade corresponde a Pst=1;

- Indice de severidade do "flicker" para longa duração (Plt) - indice que permite avaliar a severidade do fenómeno de "flicker" durante largos periodos de tempo (intervalo de observação 2 horas), tendo em conta os sucessivos valores dos indices Pst nesse mesmo periodo;

- Indice de severidade equivalente do "flicker" (Ast e Alt) - indices que avaliam a severidade equivalente do fenómeno de "flicker" em periodos curtos e longos.

Constata-se que as variações de luminosidade das lâmpadas alimentadas por uma corrrente sinusoidal de 50 Hz provocam variações de luminosidade com uma frequência de 100 Hz, que não são perceptíveis pelo olho humano atendendo ao efeito de persistência da luz na nossa retina. No entanto se a frequência das variações diminui o olho humano torna-se sensível desde que a amplitude desta variação ultrapasse também um certo limite.

Quando a frequência de variação da luminância baixa este limite diminui também e passa por um mínimo para uma frequência próxima dos 20 Hz, tornando a subir seguidamente. O olho humano comportanta-se assim como um filtro linear. A partir desta análise verifica-se que o incómodo maior para o olho humano, provocado pelas oscilações de tensão, tem lugar a uma frequência próxima dos 10 Hz e para uma amplitude constante da perturbação - $\mathbf{a_f}$.

Conforme já se mencionou, existe portanto uma relação entre a frequência da tensão de alimentação (f) e a frequência de variação da luminância (f_l) tal que:

$$f_l = 2f$$

Desta forma, toma-se como referência o incómodo produzido pelas oscilações de tensão de frequência 10 Hz e amplitude equivalente a_{10} tal que:

$$a_{10} = g_f a_f$$

Representando o factor g_f a relação entre a amplitude a_f, a uma frequência f, e a amplitude a_{10} (f=10 Hz), de forma a que a sensação de incomodo seja igual.

No caso de várias variações simultâneas de amplitude a_{fi}, para diferentes frequências fi, pode-se obter uma sensação global de incómodo dada por:

$$a_{10} = \sqrt{\sum a_{fi}^2 g_{fi}^2} = \sqrt{\sum a_{10i}^2}$$

Por outro lado, uma flutuação a_{10} (f=10 Hz) com uma duração de T produz a mesma sensação que uma flutuação $2a_{10}$ (f=10 Hz) com T/4 de duração. Ou seja deve haver uma igualdade de valores do integral

$$\int_0^T a_{10}^2 dt$$

Experimentalmente obteve-se o seguinte gráfico, onde se descreve a curva de ganho do conjunto olho lâmpada no caso de ser uma lâmpada de incadescência ou uma lâmpada fluorescente.

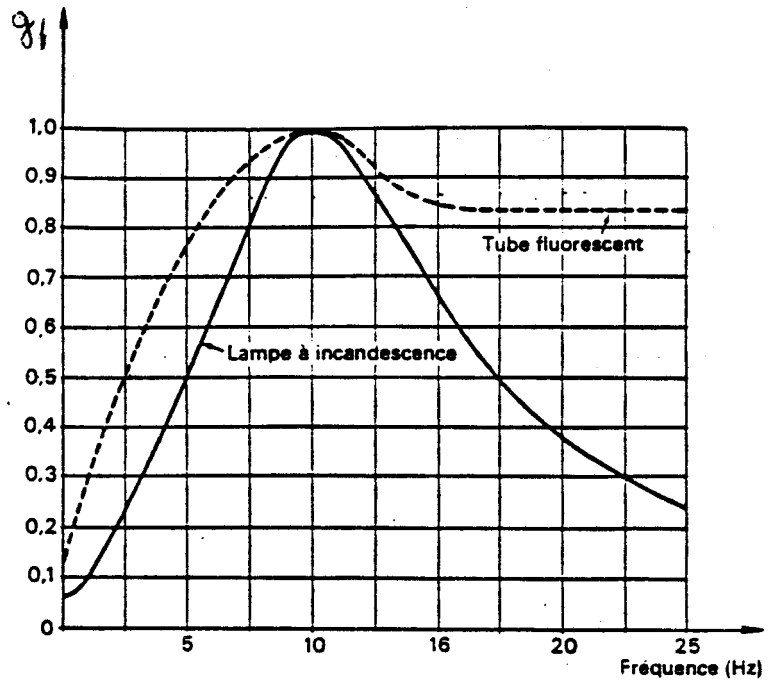


Figura 28 - Curva de ganho do conjunto olho lâmpada

6.2 Medição do fenómeno de "Flicker"

Para proceder à avaliação do incómodo provocado pelo fenómeno de "flicker" foram então desenvolvidos equipamentos de medida. Estes equipamentos são designados de medidores de "flicker" ou flickómetros e baseiam o seu principio de funcionamento na detecção de flutuações de tensão que afectam a sensibilidade do olho humano.

Estes aparelhos de medida apresentam uma estrutura semelhante à que se descreve na figura 29. Apresentam os seguintes andares:

- Um circuito eléctrico que extrai, a partir do valor fundamental da tensão da rede, a parte da amplitude correspondente à flutuação. O circuito só é sensível a frequências situadas numa gama de 1,5 a 30 Hz;
- Um circuito integrador com tempo de resposta adequado que integra o valor da tensão flutuante em períodos de aproximadamente 1 minuto, calculando posteriorme o seu valor médio;
- Um sistema de registo digital que converte o valor médio calculado numa grandeza digital e o guarda em suporte de memória adequado.

A informação obtida à saída do medidor de "flicker" pode ser comparada com limites de perceptibilidade e assim dar uma ideia do grau de perturbação existente localmente. A norma CENELEC apresenta por sua vez os valores máximos admissíveis para o "flicker" em função da frequência das perturbações. A figura 30 apresenta essa curva limite.

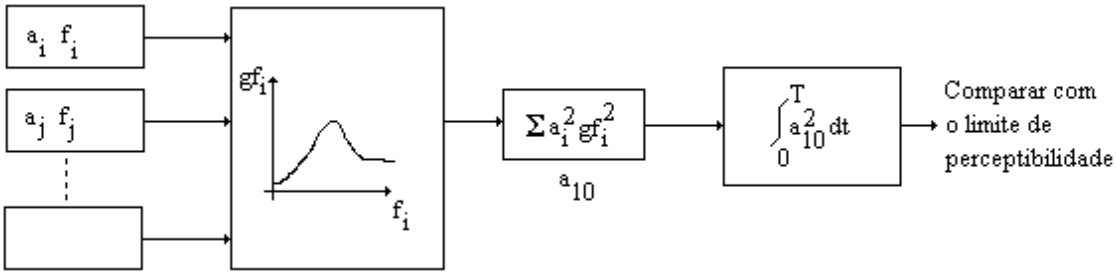


Figura 29 - Diagrama de blocos de um medidor de flicker.

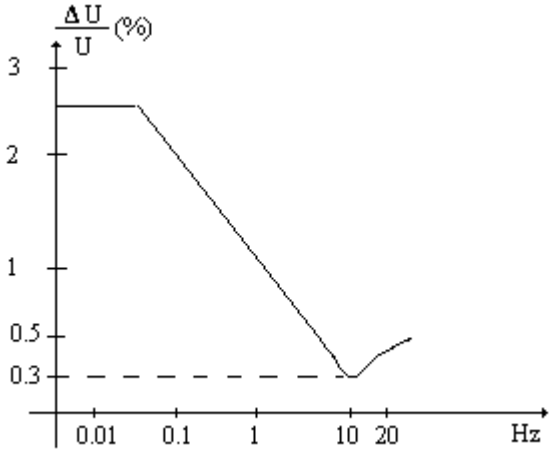


Figura 30 - Andamento típico da curva limite de "flicker" da tensão em função da frequência.

Para efeitos de avaliação da qualidade de tensão segundo a vertente do fenómeno de flicker procede-se de forma semelhante à descrita no capítulo 2, e utilizada para avaliar a poluição harmónica e os desequlibrios de tensões no sistema trifásico. Assim, para além indicadores de incómodo fornecidos pelos medidores de "flicker", outros indicadores são utilizados para proceder a esta avaliação. Entre estes estão os indices Pst, Plt, Ast e Alt. Estes indicadores podem ser calculados de acordo com as seguintes expressões:

$$P_{st} = 0.36 dr^{0.31} RF \tag{6.1}$$

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\Sigma_{i=1}^{N} \frac{P_{sti}^{3}}{N}} \tag{6.2}$$

onde:

d - valor da variação relativa da tensão ΔU/U em %;
r - número de variações da tensão por minuto;
R - factor de frequência que toma valores dependentes do valor de r;
F - factor de equivalência que depende da forma da flutuação da tensão (para uma flutuação regular rectangular F=1);
N - número de indicadores Pst considerados durante o intervalo de 2 horas.

Adicionalmente recorre-se a representações gráficas semelhantes às descritas no capítulo 2. Também neste caso o tempo total de observação é recomendado que seja pelo menos de uma semana, devendo ser retidos os seguintes parâmetros:

- o maior Pst;
- o maior Plt.

Fenómenos de "flicker" com duração inferior a 1,5 h por semana podem ser desprezados (##) .

(##) - Comentários sobre o grau de admissibilidade do "flicker" podem ser encontrados nas actas do Congresso da CIGRE de 1992, no volume do comité de estudos 36 - "Interference".

6.3 Avaliação analítica do fenómeno de "flicker"

O impacto do fenómeno de flicker pode ser estudado recorrendo a modelos matemáticos de fácil implementação. Assim, um gerador de "flicker" pode ser modelizado como uma impedância que passa rapidamente de um valor Z1 a um valor Z2., de acordo com o descrito na figura 31.

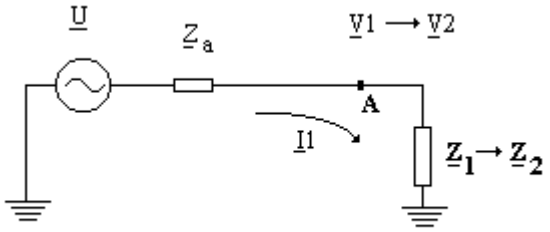


Figura 31 - Modelo equivalente simplificado de um gerador de "flicker".

Neste caso a tensão no barramento A passa de $\underline{V}_1$ a $\underline{V}_2$ e pode ser calculada como

$$\underline{V}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 = \underline{U} - \underline{Z}_a \underline{I}_1 = \frac{\underline{U}\,\underline{Z}_1}{(\underline{Z}_a + \underline{Z}_1)}$$

$$\underline{V}_2 = \frac{\underline{U}\,\underline{Z}_2}{(\underline{Z}_a + \underline{Z}_2)}$$

A variação de tensão relativa ($\Delta\underline{V}=\underline{V}1-\underline{V}2$) neste barramento A é assim dada por:

$$\frac{\Delta \underline{V}}{\underline{U}} = \frac{\underline{Z}_a(\underline{Z}_1 - \underline{Z}_2)}{(\underline{Z}_a + \underline{Z}_1)(\underline{Z}_a + \underline{Z}_2)} \qquad (6.3)$$

Consoante o valor de Z2 assim as variações de tensão são mais ou menos perceptíveis. Desta forma podem dar-se os seguintes casos:

1. $Z_a \langle Z_2 \Rightarrow$ Variações de tensão limitadas;

2. $Z_a \approx Z_2$

$Z_a \geq Z_2$ $\Rightarrow$ Variações de tensão muito grandes;

Seguidamente descreve-se um exemplo onde se procura calcular, de forma analítica, o valor do indicador de severidade Pst, tendo em conta os parametros eléctricos da rede e do aparelho de utilização a funcionar.

Supondo que se pretende avaliar os efeitos da ligação de um motor assincrono num determinado barramento e para o qual se prevê um funcionamento intermitente.Os parâmetros da rede e do rotor são os seguintes:

- U (V) - tensão nominal da rede;
- Scc (MVA); Φcc=arctg(Xcc/Rcc) - potência de c.c. e argumento do equivalente a montante da rede no ponto de interligação do motor;
- Sn (MVA) - potência aparente nominal do motor;
- Sa (MVA) - potência aparente de arranque do motor;
- cosΦa - factor de potência de arranque do motor;
- N - número de arranques do motor durante um minuto.

Considerando a expressão (6.3), convertendo as grandezas eléctricas em p.u. e admitindo que antes da ligação do motor a tensão no barramento de ligação era próxima da tensão nominal (1 p.u.) podemos escrever:

$$\frac{\Delta V}{U} = 1 - \frac{\underline{Z}_2}{(\underline{Z}_a + \underline{Z}_2)}$$

onde $\underline{Z}_a$ corresponde à impedância equivalente de c.c. e $\underline{Z}_2$ à impedância equivalente de arranque do motor. O que é equivalente a

$$\frac{\Delta V}{U} = \frac{\underline{Z}_a + \underline{Z}_2 - \underline{Z}_2}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_2}$$

Admitindo que a impedância equivalente de c.c. é bastante menor que a impedância equivalente de arranque do motor pode-se escrever

$$\frac{\Delta V}{U} \cong \frac{Z_a}{Z_2}$$

Dado que

$\underline{Z}_a = \frac{1}{Scc} e^{j\Phi cc}$ (p.u.) e $\underline{Z}_2 = \frac{1}{Sa} e^{j\Phi a}$

pode-se finalmente escrever que a queda de tensão relativa em valor percentual (d) é dada por:

$$\frac{100\Delta \underline{V}}{\underline{U}} = \frac{100Sa}{Scc} e^{j(\Phi cc - \Phi a)}$$

$$d = \frac{100Sa}{Scc} \cos(\Phi cc - \Phi a)$$

Assim o valor de Pst pode ser caculado utilizando a expressão (6.1) como

$$Pst = 0{,}36 \frac{100Sa}{Scc} \cos(\Phi cc - \Phi a)(2N)^{0.31} 0.7$$

atendendo a que se admite que quando o motor arranca existem duas variações de tensão (queda devida ao arranque e restabelecimento após arranque) - 2N. Neste caso admite-se que o produto dos factores de frequência e equivalência da expressão (6.1) - FR=0,7.

Calculos semelhantes a estes podem ser utilizados para avaliar as consequências para uma instalação industrial, em termos do efeito de flicker, se vierem a ser ligados num determinado ponto da rede cargas perturbadoras.

6.4 - Correcção e limitação do efeito "flicker"

Assim para reduzir o efeito de "flicker" podem ser adoptadas algumas medidas de entre as quais se salientam as seguintes:

- deve procurar-se que a impedância Z2 da carga tome um valor tão elevado quanto possível;
- a impedância Za deve, por seu lado, apresentar um valor tão baixo quanto possível a que equivale uma poteência de c.c. de valor elevado.

Atendendo às relações existentes entre Scc e a potência máxima do aparelho perturbador (Sa) dadas por

$$Scc \cong \frac{V^2}{Z_a} \quad \text{e} \quad Sa \cong \frac{V^2}{Z_2}$$

pode-se escrever que para obter perturbações inferiores a x % (normalmente utiliza-se 1,5 %) deve procurar garantir-se a seguinte relação:

$$Sa \leq 0.015 Scc$$

Para tal é necessário adoptar procedimentos, de entre os quais se mencionam os seguintes:

- Ligar os aparelhos perturbadores a níveis de tensão superiores;
- Instalar geradores próximos das cargas perturbadoras, para assim aumentar a potência de c.c.;
- Ligar baterias de condensadores em série a montante do ponto de interligação à rede da carga perturbadora;
- Utilizar dispositivos baseados em electrónica do estado sólido, que compensem activamente as variações de potência que se verificam aquando do funcionamento das cargas críticas.

Este último dispositivo tem vindo a ser ultimamente utilizado com grande frequência, dado os avanços conseguidos na electrónica do estado sólido. De referir que geralmente as cargas perturbadoras apresentam elevados consumos de potência reactiva, responsáveis pelas perturbações de tensão criadas.

Nestes sistemas, a ligar em paralelo com as cargas perturbadoras, existem condensadores que fornecem energia reactiva e indutâncias cuja ligação na rede é controlada por pontes tiristorizadas e que, desta forma, tentam manter o mais constante possível o consumo de potência reactiva do conjunto carga perturbadora - compensador estático.

Em vários países Europeus são, hoje em dia, adoptados procedimentos sistemáticos que avaliam previamente o grau de perturbação para a rede pública que pode resultar da ligação de cargas pertubadoras. A metodologia seguida é semelhante à que se descreveu neste capítulo.

As empresas de distribuição de energia podem assim impor a estes clientes que sejam antecipadamente tomadas medidas que limitem estas pertubações. Os trabalhos de Jaime Roman e Tomas Gomez do IIT (Madrid), indicados na bibliografia deste documento, descrevem o tipo de procedimentos que actualmente são seguidos em Espanha neste domínio.

7. CONCLUSÕES

As questões ligadas com a avaliação da qualidade de tensão constituem actualmente uma preocupação importante para o sector eléctrico industrial, quer ao nível das empresas distribuidoras quer ao nível dos consumidores de energia. Futuramente, e no âmbito de um mercado competitivo da energia que tende a impor-se, a importância dos aspectos relacionados com a qualidade de tensão e continuidade de serviço desempenharão um papel primordial nas relações entre empresas distribuidores e clientes.

Será através da avaliação destes problemas que se estabelecerão mecanismos reguladores que exigirão, por um lado às empresas distribuidoras a realização de investimentos para a melhoria da qualidade de serviço, e por outro a implementação de medidas ao nível dos consumidores para limitar a propagação para a rede pública de perturbações geradas por cargas especias.

Acompanhando esta tendência a comunidade científica tem vindo a contribuir para o estabelecimento de metodologias e procedimentos sistemáticos de análise e avaliação destes problemas. Simultaneamente as Universidades têm contribuido para avanços no desenvolvimento e implementação de equipamentos menos poluidores e capazes de reduzir perturbações no sistema de energia.

Em Portugal as questões da qualidade de tensão são actualmente consideradas apenas pontualmente, quando ocorrem problemas na rede ou em algumas unidades industriais, não havendo neste domínio regulamentação que determine uma preocupação sistemática ao nível do projecto e licenciamento de novas instalações.

Conforme já se mencionou as questões de qualidade de tensão estão intimamente ligadas com as da continuidade de serviço, pelo que, no seu conjunto, esta temática define uma área científica. Aliás, a utilização crescente de dispositivos de electrónica do estado sólido do tipo compensadores estáticos, interruptores estáticos, fontes de alimentação ininterruptíveis, procura, de uma forma integrada, garantir simultaneamente qualidade de tensão e continuidade de serviço a consumidores mais exigentes, tendo em consideração o tipo de processos industriais utilizados.

É importante mencionar que a utilização recente de dispositivos do tipo "Insulate-gate bipolar transistors" (IGBTs), permitindo velocidades de comutação elevadas, tem vindo a reduzir substancialmente os anteriores problemas de poluição harmónica nas redes industriais. Por outro lado, estes componentes têm permitido o desenvolvimento de novos dispositivos estáticos com tempos de resposta muito elevados que permitem reduzir ou até mesmo eliminar problemas de sobretensões, ocos de tensão, micro-cortes e fenómenos de flicker. Entre estes dispositivos são de mencionar o recuperador dinâmico de tensão (DVR - "Dynamic Voltage Restorer"), supressores de sobretensões, filtros activos e condensadores estáticos.

Neste documento procurou-se descrever o problema da qualidade de tensão e apresentar metodologias de avaliação, bem como procedimentos que permitam limitar e corrigir algumas das perturbações que possam ser geradas em unidades industriais. Embora sem ser um documento exaustivo relativamente a este domínio técnico/científico, procurou-se na sua elaboração incluir uma elevada componente informativa e simultaneamente sensibilizar os futuros engenheiros electrotécnicos para a importância dos problemas relacionados com a qualidade de tensão.

Por outro lado, são também sugeridos artigos e livros, que se podem encontrar na bibliografia deste trabalho e que permitem um aprofundamento das questões abordadas.

BIBLIOGRAFIA

- J. Arrillaga, D. Bradley, P. Bodger, "Power System Harmonics", John Wiley and Sons., 1988.
- Franklim Guerra Pereira, "Poluição Harmónica das Redes Eléctricas", Publicações Técnicas EFACEC, Porto, 1986.
- "Characteristics of the electricity supply voltage for low voltage consumers", Relatório UNIPEDE, Revue Généralle d'Electricité, Setembro 1981.
- "Las perturbaciones en Electricidad", Edição ASINEL, Madrid, 1980.
- A. Arruda, F. Cavalcanti, N. da Silva Reis, R. Monticelli, R. Almeida e S. Yagi, "Power System Harmonics and Flicker Survey", Proc. CIGRE 1992, Paris 1992.
- A. Robert, J. Marquet, "Assessing Voltage Quality with Relation to Harmonics Flicker and Unbalance", Proc. CIGRE 1992, Paris 1992.
- J. Román, T. Gomez, J. A. Diaz-Hernando, G. Vargas, "Utility Practical Guidelines for the Acceptance of Users with Disturbance Generating Equipment", Proc. PQA 92, Atlanta, Georgia, USA, 1992.
- Tomás Gomez, "Calidad de la Onda de Tension", Curso de Doutorado, 1994-95, IIT, Universidade Pontificia Comillas, Madrid.
- Ana Claudia Sousa, "Breve Análise das Perturbações nas Redes de Energia", Relatório de estágio IIT, Madrid, Maio de 1995.
- N. Hingorani, "Introducing Custom Power", in IEEE Sepctrum, June 1995.