

“Este texto foi preparado como um curso de extensão: Influência dos Harmônicos nas Instalações Elétricas Industriais. Trata-se de um curso voltado para profissionais atuantes no setor elétrico e interessados em acompanhar as inovações tecnológicas decorrentes da evolução da eletrônica de potência, especialmente as possibilidades do condicionamento de energia elétrica visando aprimorar a qualidade do produto energia elétrica. Inicialmente, no capítulo 1, que foi publicado em duas partes, fez-se uma discussão sobre fator de potência e harmônicas, vinculando-os em termos da influência das harmônicas sobre o fator de potência de um sistema. Neste capítulo, são apresentadas algumas normas e regulamentações que limitam a contaminação harmônica de um sistema ou a emissão de uma carga. No capítulo 3 serão apresentados os componentes semicondutores de potência utilizados em conversores estáticos que, em última instância, são os responsáveis pelo aumento da distorção presente na rede. Paradoxalmente, são esses mesmos conversores que permitem a compensação das distorções quando adequadamente empregados. No capítulo 4 serão apontados os efeitos sobre os componentes de um sistema elétrico e as causas da distorção harmônica. Nos capítulos 5, 6 e 7 serão apresentadas soluções para a minimização da distorção harmônica, iniciando com correções

passivas e passando para as ativas, como os pré-reguladores de fator de potência e os filtros ativos.”

José Antenor Pomilio – engenheiro eletrícista, mestre e doutor em engenharia elétrica pela Universidade Estadual de Campinas – Unicamp (1983, 1986 e 1991, respectivamente). É professor da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp desde 1984. Participou do grupo de eletrônica de potência do Laboratório Nacional de Luz Sincrotron (CNPq) entre 1988 e 1993, sendo chefe do grupo entre 1988 e 1991. Realizou estágios de pós-doutoramento no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Pádua (1993 e 1994) e no Departamento de Engenharia Industrial da Terceira Universidade de Roma (2003), ambas na Itália. Foi *liaison* da IEEE Power Electronics Society para a região 9 (América Latina) em 1998 e 1999. Foi membro do Comitê de Administração da IEEE Power Electronics Society no triênio 2000/2002. Foi editor da Revista Eletrônica de Potência e editor associado das revistas IEEE Trans. on Power Electronics e Controle & Automação (SBA). Foi presidente da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (2000-2002) e é membro de sua diretoria e do Conselho Deliberativo.

CAPÍTULO 2

2 - NORMAS RELATIVAS A FATOR DE POTÊNCIA E DISTORÇÃO HARMÔNICA

2.1- Fator de potência

A atual regulamentação brasileira do fator de potência estabelece que o mínimo fator de potência (FP) das unidades consumidoras alimentadas em baixa tensão é de 0,92. A Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), em seu documento “Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – Prodlist módulo 8 – qualidade da energia elétrica”, de 24 de agosto de 2005 traz o seguinte texto:

“A presença da energia e/ou potência reativas faz com que o transporte de potência ativa demande maior capacidade do sistema de transporte pelo qual ela flui. Por este motivo, a responsabilidade de um cliente marginal nos investimentos destinados à expansão da rede será tanto maior quanto mais elevada for sua potência reativa ou, de modo equivalente, quanto menor for seu fator de potência.

“Muitas cargas tradicionais, como é o caso dos motores elétricos, têm um princípio de operação que exige um consumo de potência reativa. Assim, parece adequado que o regulador admita uma certa tolerância para o fator de potência das unidades consumidoras. O valor desta tolerância é expresso através do chamado fator de potência de referência que está hoje fixado no valor de 0,92, o que equivale a permitir ao cliente um consumo de 0,426 kVArh por kWh

de energia que absorve.

“Nos sistemas senoidais, tanto os monofásicos quanto os trifásicos equilibrados e simétricos, a noção do fator de potência é aceita consensualmente. Hoje em dia a proliferação de cargas não lineares e/ou não balanceadas, assim como de cargas com dispositivos chaveados de eletrônica de potência, determina um aprimoramento das disposições contidas nas regulamentações vigentes. Tal melhoria encontra sustentação na tecnologia de amostragem digital hoje disponível no mercado brasileiro, o qual dispõe de instrumentos de medição que permitem incorporar conceitos de potência e fator de potência mais atuais”.

O referido documento, no entanto, ainda estabelece para o cálculo do FP procedimentos que consideram formas de onda senoidais:

$$f = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad \text{ou} \quad \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (2.1)$$

EA: Energia ativa; ER: Energia reativa

Permite-se, no entanto, que cada concessionária adote outros procedimentos que contemplem a realidade local, ou seja, abra a possibilidade do uso do conceito mais geral de FP. O cálculo do FP

deve ser feito por média horária. O consumo de reativos além do permitido (0,426 kVArh por kWh) é cobrado do consumidor. No intervalo entre 6 e 24 horas isso ocorre se a energia reativa absorvida for indutiva e das 0 às 6 horas se for capacitiva (Crestani, 1994).

Conforme foi visto anteriormente, as componentes harmônicas da corrente também contribuem para o aumento da corrente eficaz, de modo que elevam a potência aparente sem produzir potência ativa (supondo a tensão senoidal). Assim, uma correta medição do FP deve levar em conta a distorção da corrente, e não apenas a componente reativa (na frequência fundamental), o que não ocorre em grande parte dos medidores, embora os aparelhos digitais tenham condição de fazê-lo, mesmo com algum grau de erro.

2.2. Norma IEC 61000-3-2: limites para emissão de harmônicas de corrente (<16 A por fase)

A IEC (International Electrotechnical Commission) é uma entidade internacional, mas com abrangência essencialmente européia, que gera recomendações técnicas na área de eletricidade. Com a aprovação da Comunidade Européia, ou de países individualmente, são geradas as EN – European Norm –, que reproduzem o conteúdo estabelecido nas respectivas IEC.

Essa norma (IEC, 2001) incluindo as alterações feitas pela emenda 14, de janeiro de 2001, refere-se às limitações das harmônicas de corrente injetadas na rede pública de alimentação. Aplica-se a equipamentos elétricos e eletrônicos que tenham uma corrente de entrada de até 16 A por fase, conectado a uma rede pública de baixa tensão alternada, de 50 ou 60 Hz, com tensão fase-neutro entre 220 e 240 V. Para tensões inferiores, os limites não foram estabelecidos, pois essa norma tem aplicação principalmente na Comunidade Européia, onde as tensões fase-neutro encontram-se na faixa especificada.

Os equipamentos são classificados em quatro classes:

Classe A: Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada; aparelhos de uso doméstico, excluindo os classe D; ferramentas, exceto as portáteis; “dimmers” para lâmpadas incandescentes; equipamentos de áudio; e todos os demais não incluídos nas classes seguintes.

Classe B: Ferramentas portáteis.

Classe C: Dispositivos de iluminação.

Classe D: Computadores pessoais, monitores de vídeo e aparelhos de televisão, caso a corrente de entrada apresente a forma mostrada na figura 1.2. A potência ativa de entrada deve ser igual ou inferior a 600 W, medida esta feita obedecendo às condições de ensaio estabelecidas na norma (que variam de acordo com o tipo de equipamento).

Antes da emenda 14, a definição de classe D era feita a partir de um envelope dentro do qual estaria a corrente de entrada, atingindo qualquer equipamento monofásico, como mostra a figura 2.1. Tal definição mostrou-se inadequada devido ao fato de que os problemas mais relevantes referem-se aos equipamentos agora incluídos na classe D e na classe C (reatores eletrônicos), permitindo retirar dos demais aparelhos essas restrições.

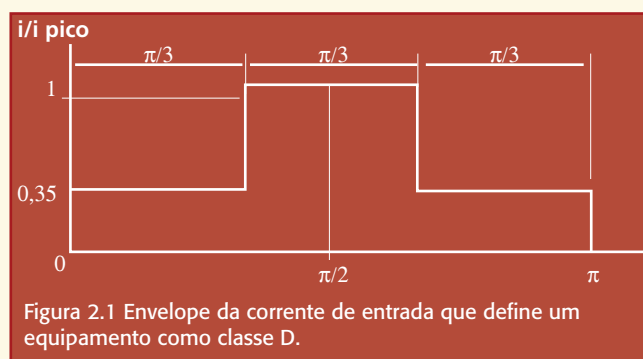


Figura 2.1 Envelope da corrente de entrada que define um equipamento como classe D.

A inclusão apenas desses aparelhos como classe D deve-se ao fato de seu uso se dar em larga escala e ser difundido por todo o sistema. Outros equipamentos poderão ser incluídos nessa categoria caso passem a apresentar tais características.

Os valores de cada harmônica são obtidos após a passagem do sinal por um filtro passa-baixos de primeira ordem com constante de tempo de 1,5 s. Aplica-se a transformada discreta de Fourier (DFT), com uma janela de medição entre 4 e 30 ciclos da fundamental, com um número inteiro de ciclos. Calcula-se a média aritmética dos valores da DFT durante todo o período de observação. Esse período varia de acordo com o tipo de equipamento, tendo como regra geral um valor que permita a repetibilidade dos resultados.

A medição da potência ativa é feita de maneira análoga, devendo-se, no entanto, tomar o máximo valor que ocorrer dentro do período de observação. Esse é o valor que um fabricante deve indicar em seu produto (com uma tolerância de +/- 10%), conjuntamente como fator de potência (para classe C). Caso o valor medido seja superior ao indicado, deve-se usar o valor medido.

Para cada harmônica medida da forma descrita, o valor deve ser inferior a 150% do limite da tabela I, em qualquer situação de operação do aparelho.

As correntes harmônicas com valor inferior a 0,6% da corrente de entrada (medida dentro das condições de ensaio) ou inferiores a 5 mA não são consideradas. Foi definida a corrente harmônica parcial de ordem ímpar, para componentes entre a 21ª e a 39ª como sendo:

$$I_{1-9} = \sqrt{\sum_{n=21,23,\dots}^39 I_n^2} \quad (2.2)$$

Para a componente de ordem 21 ou superior (ímpar), o valor individual para cada uma delas pode exceder o limite em mais 50% desde que a corrente harmônica parcial de ordem ímpar medida não exceda o valor teórico (obtido com os valores da tabela), nem exceda o limite individual de 150% do valor da tabela.

A Tabela 2.1 indica os valores máximos para os harmônicos de corrente, no fio de fase (não no de neutro).

Os valores limites para a classe B são os mesmos da classe A, acrescidos de 50%.

Tabela 2.I Limites para os Harmônicos de Corrente

Ordem do Harmônico n	Classe A Máxima corrente [A]	Classe B Máxima corrente [A]	Classe C (>25W) % da fundamenal	Classe D (>75W, <600W) [mA/W]
Harmônicas Ímpares				
3	2,30	3,45	30.FP	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,115	7	1,0
9	0,40	0,60	5	0,5
11	0,33	0,495	3	0,35
13	0,21	0,315	3	0,296
15≤ n ≤39	$0.15 = \frac{15}{n}$	$0.225 = \frac{15}{n}$	3	3,85/n
Harmônicos Pares				
2	1,08	1,62	2	FP: fator de potência
4	0,43	0,645		
6	0,3	0,45		
8≤ n ≤40	$0.23 = \frac{8}{n}$	$0.35 = \frac{8}{n}$		

2.3. IEC 61000-3-4

Esse relatório técnico (IEC, 1998) pode ser aplicado a qualquer equipamento elétrico ou eletrônico, cuja corrente de entrada seja maior que 16 A. Sua tensão de alimentação deve ser menor que 240 V para equipamentos monofásicos ou menor que 600 V para equipamentos trifásicos. A frequência nominal da rede pode ser 50 Hz ou 60 Hz.

No referido relatório são apresentados os limites para distorção harmônica em equipamentos cuja potência aparente seja menor ou igual a 33 vezes a potência de curto-circuito da instalação. A tabela 2.II apresenta os limites individuais de corrente para cada harmônico que estão normalizados em relação à fundamental.

Define-se potência de curto-circuito (Rsce) como a relação entre a tensão nominal ao quadrado e a impedância de curto-circuito. Se o equipamento a ser analisado exceder os limites dessa primeira tabela, e a potência de curto-circuito permitir, outros limites podem

ser aplicados. Se este for monofásico ou trifásico desbalanceado, pode-se utilizar os limites da tabela 2.III. Podemos observar na referida tabela que, quanto maiores forem os valores de potência de curto-circuito, maiores serão os limites de distorção tolerados.

Nesse caso, algumas recomendações devem ser seguidas. O valor relativo de cada harmônico não deve exceder o limite de 16/n%. Para valores intermediários de potência de curto-circuito, pode-se aplicar interpolação linear para obter os limites de distorção. No caso de equipamentos trifásicos desbalanceados, a corrente de cada uma das fases deve estar dentro desses limites. Caso o equipamento seja trifásico equilibrado pode-se ainda utilizar a tabela 2.IV. Algumas recomendações também devem ser seguidas. O valor relativo de cada harmônico não deve exceder o limite de 16/n%. Para valores intermediários de potência de curto-circuito, pode-se aplicar interpolação linear para obter os limites de distorção.

Tabela 2.2 - Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental

Componente Harmônico n	Harmônico Admissível In/I ₁ %	Componente Harmônico n	Harmônico Admissível In/I ₁ %
3	21,6	21	≤0,6
5	10,7	23	0,9
7	7,2	25	0,8
9	3,8	27	≤0,6
11	3,1	29	0,7
13	2	31	0,7
15	0,7	≤33	≤0,6
17	1,2		
19	1,1	Sempre	≤8/n ou ≤0,6

Tabela 2.3 - Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental

Mínimo Rsce	Fator de distorção harmônica admissível %		Limites individuais de harmônico admissível I _n /I ₁ %							
	THD	PWHD	I ₃	I ₅	I ₇	I ₉	I ₁₁	I ₁₃		
66	25	25	23	11	8	6	5	4		
120	29	29	25	12	10	7	6	5		
175	33	33	29	14	11	8	7	6		
250	39	39	34	18	12	10	8	7		
350	46	46	40	24	15	12	9	8		
450	51	51	40	30	20	14	12	10		
600	57	57	40	30	20	14	12	10		

Tabela 2.4 - Limites individuais de harmônicos de corrente para equipamentos trifásicos em % da fundamental

Mínimo Rsce	Fator de distorção harmônica admissível %		Limites individuais de harmônico admissível I_n/I_1 %			
	THD	PWHD	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}
66	16	25	14	11	10	8
120	18	29	16	12	11	8
175	25	33	20	14	12	8
250	35	39	30	18	13	8
350	48	46	40	25	15	10
450	58	51	50	35	20	15
600	70	57	60	40	25	18

2.4. Recomendação IEEE para práticas e requisitos para controle de harmônicas no sistema elétrico de potência: IEEE-519

Essa recomendação produzida pelo IEEE (1991) descreve os principais fenômenos causadores de distorção harmônica, indica métodos de medição e limites de distorção. Seu enfoque é diverso daquele da IEC 61000-3-2, uma vez que os limites estabelecidos referem-se aos valores medidos no ponto de acoplamento comum (PAC), e não em cada equipamento individual. A filosofia é que não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os outros consumidores conectados à mesma alimentação.

Os limites diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de curto-circuito do PAC. Obviamente, quanto maior for a corrente de curto-circuito (I_{cc}) em relação à corrente de carga, maiores serão as distorções de corrente admissíveis, uma vez que elas distorcerão em menor intensidade a tensão

no PAC. À medida que se eleva o nível de tensão, menores são os limites aceitáveis.

A grandeza TDD – Total Demand Distortion – é definida como a distorção harmônica da corrente, em porcentagem, da máxima demanda da corrente de carga (demanda de 15 ou 30 min). Isso significa que a medição da TDD deve ser feita no pico de consumo. Harmônicas pares são limitadas a 25% dos valores acima. Distorções de corrente que resultem em nível CC não são admissíveis.

Tabela 2.5 - Limites de Distorção da Corrente para Sistemas de Distribuição (120V a 69kV)

Máxima corrente harmônica em % da corrente de carga (I_o - valor da componente fundamental)						
Harmônicas ímpares:						
I_{cc}/I_o	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	TDD(%)
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Tabela 2.6 - Limites de Distorção da Corrente para Sistemas de Subdistribuição (69001V a 161kV)

Limites para harmônicas de corrente de cargas não-lineares no PAC com outras cargas						
Harmônicas ímpares:						
I_{cc}/I_o	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	TDD(%)
<20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20<50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50<100	5	2,25	2	0,75	0,35	6
100<1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	4,5	3,5	3	1,25	0,7	10

Tabela 2.7 - Limites de distorção de corrente para sistemas de alta tensão (>161kV) e sistemas de geração e co-geração isolados.

Harmônicas ímpares:						
Icc/Io	<11	11 ≤ n < 17	17 ≤ n < 23	23 ≤ n < 35	35 < n	TDD(%)
<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
≥50	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Para os limites de tensão, os valores mais severos são para as tensões menores (nível de distribuição). Estabelece-se um limite individual por componente e um limite para a distorção harmônica total.

Tabela 2.8 - Limites de distorção de tensão

	Distorção individual	THD
69kV e abaixo	3%	5%
69001V até 161kV	1,5%	2,5%
Acima de 161kV	1%	1,5%

2.5. Regulamentação brasileira

Para a rede básica de energia, o Operador Nacional do Sistema (ONS) estabelece desde 2002 parâmetros de qualidade para a tensão suprida. Mas, do ponto de vista do consumidor, as restrições a serem consideradas são, na imensa maioria, as do sistema de distribuição, as quais ainda estão em discussão.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), no já citado documento “Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – Prodinst módulo 8 – qualidade da energia elétrica”, propõe valores para a distorção harmônica da tensão no sistema de distribuição. Tal regulamentação ainda não está definida.

Tabela 2.9 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais expressos em porcentagem da tensão fundamental

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N \leq 138kV$	3

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.3)$$

A figura 2.2 mostra uma forma de onda de tensão que segue as restrições para tensão inferior a 1 kV. A DTT é de 10% e cada componente está abaixo do limite da tabela. Note-se que essa distorção é, visualmente, significativa.

Tabela 2.10 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (expressos como porcentagem da tensão fundamental).

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1kV$	$1kV < V_n \leq 13,8kV$	$13,8kV < V_n \leq 69kV$	$69kV < V_n \leq 138kV$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Figura 2.2 Tensão com DTT de 10%, em conformidade com os limites.



2.6. Comentários finais

Estão em andamento conversações entre o IEEE e a IEC para consolidarem as normas geradas pelas instituições. Tais processos, no entanto, são demorados, devido aos grandes interesses econômicos envolvidos.

Para ambientes industriais, o enfoque do IEEE parece mais

consistente do que o do IEC. No entanto, parece pouco adequado para uma situação mais atual na qual registra-se um grande aumento nas cargas não lineares de uso doméstico (TV, computadores, lâmpadas fluorescentes etc.). Ou seja, a distorção da tensão é ser causada, crescentemente, por consumidores domésticos, e não industriais.

O ponto da IEC é garantir que cada equipamento apresente uma reduzida distorção, o que garantirá um bom comportamento no conjunto de cargas. No que se refere à regulamentação brasileira, muito mais tolerante do que a do IEEE, deve-se perguntar sobre o possível impacto de distorções significativas em diversos processos que dependem de uma baixa distorção da forma de onda da tensão.

A ausência de uma definição de distorção da corrente é um problema importante para a identificação de responsabilidades. Adicione-se a isso o fato de que a distorção da corrente é, para muitas cargas eletrônicas, dependente da distorção da tensão. Ou seja, se a rede se encontra com elevada distorção pode induzir ao aumento da distorção da corrente, o que seria, assim, responsabilidade da concessionária, e não do consumidor.

2.7. Referências bibliográficas

Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel (2005), “Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – Prodist

módulo 8 – qualidade da energia elétrica”, de 24/8/2005.

M. Crestani (1994), “Com uma terceira portaria, o novo fator de potência já vale em abril”. *Eletricidade moderna*, ano XXII, n° 239, fev. 1994.

International Electrotechnical Commission (2001): IEC 61000-3-2: “Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3: Limits – Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment input current < 16 A per phase)”, 1998 e Emenda A14 (2001)

International Electrotechnical Commission (1998): IEC 61000-3-4: “Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16A”, first edition, 1998.

IEEE (1991) *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System. Project IEEE-519*, out. 1991.

ONS (2002), *Submódulo 3.8 – Requisitos mínimos para a conexão à rede básica*.

ONS (2002), *Submódulo 2.2 – Padrões de desempenho da rede básica*.

Correção

Na segunda parte deste fascículo, na edição anterior (n°2, Março de 2006), a formula 1.4 correta é:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$