



GRADUAÇÃO PRESENCIAL
1º semestre- 2016

Eficiência Energética
Engenharia Elétrica– 8º e 9º semestres

Profº. Ms. Cristiano Malheiro

cmalheiro@aedu.com
cmalheiro@anhanguera.com

<http://cristianotm.wix.com/aulas>

1

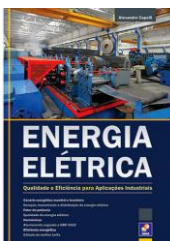


Aula 9

Bibliografia Básica Padrão



1. CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas**. 15ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2007
Na nossa biblioteca: 11 exemplares - **621.3 C935i 15.ed.**



2. CAPELLI, Alexandre. **Energia Elétrica – Qualidade e Eficiência para Aplicações Industriais**. 1ª edição. São Paulo: Editora Érica, 2013.
3. Notas de aula do próprio professor!

2





Aula 9

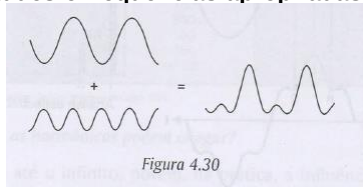
Tipos de distúrbio

6. Distorção Harmônica

Um dos distúrbios mais comuns na rede elétrica é a distorção harmônica.

Com o incremento de circuitos chaveados nas instalações, como reatores eletrônicos, fontes de computadores, inversores de frequência, entre outros, esse fenômeno aumentou nos últimos anos.

Há 100 anos atrás, Baron Jean Baptiste Fourier mostrou que qualquer forma de onda pode ser gerada a partir da soma de senóides combinando amplitudes e frequências apropriadas.



3

kroton
paixão por educar



Aula 9

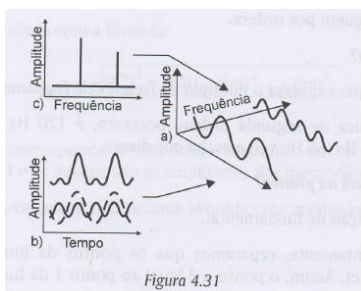
Tipos de distúrbio

6. Distorção Harmônica

Analogamente, uma forma de onda complexa pode ser decomposta nas senoides que a geram. Essa análise chama-se análise espectral.

Na figura temos duas senoides de frequências e amplitudes diferentes.

No osciloscópio veremos uma senoide pela leitura ser em função do tempo, enquanto por um instrumento que lê frequência, iríamos ver barras verticais indicando a magnitude de cada senoide nas diversas frequências do sinal.



(Capelli, 2013)

4

kroton
paixão por educar

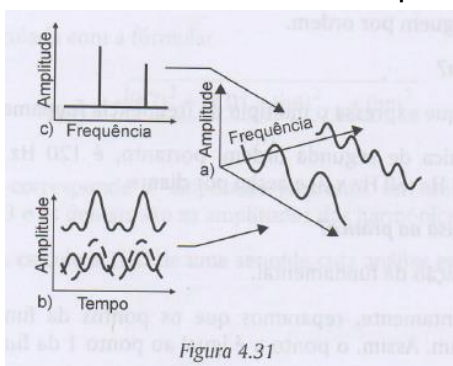


Aula 9

Tipos de distúrbio

6. Distorção Harmônica

No osciloscópio veremos uma senóide pela leitura ser em função do tempo, enquanto por um instrumento que lê frequência, iríamos ver barras verticais indicando a magnitude de cada senóide nas diversas frequências do sinal.



(Capelli, 2013)

5

kroton
paixão por educar

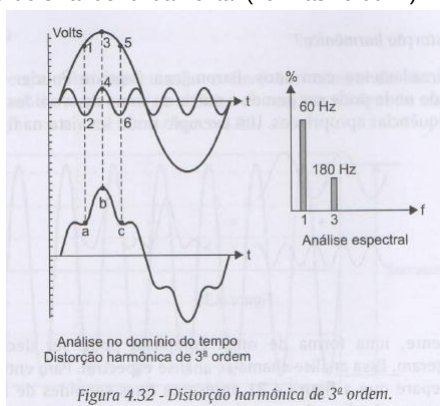


Aula 9

Tipos de distúrbio

6. Distorção Harmônica

Uma senóide de 180Hz contém uma harmônica de terceira ordem. Chamamos a frequência principal do sinal de fundamental (no Brasil é 60Hz).



(Capelli, 2013)

6

kroton
paixão por educar



Aula 9

Distorção Harmônica

O que é a ordem?

É o número que expressa o múltiplo da frequência fundamental.

Exemplo:

Uma harmônica de segunda ordem, portanto é 120Hz ($60\text{Hz} \times 2$), a de terceira ordem 180Hz ($60\text{Hz} \times 3$) e assim por diante.

7

kroton
paixão por educar



Aula 9

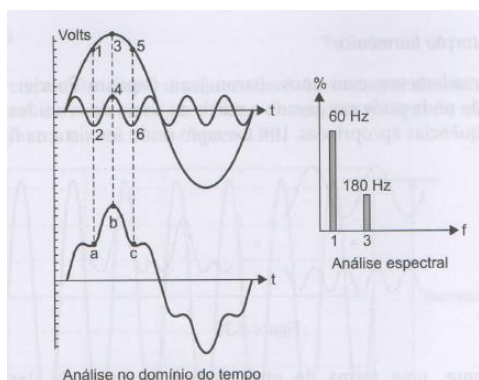
Distorção Harmônica

O que isso causa na prática?

Uma deformação da fundamental.

Olhando atentamente, reparamos que os pontos da fundamental com sua harmônica se somam. Assim o ponto a é igual ao ponto 1 da fundamental mais o 2 da harmônica.

Como o ponto 2 é negativo, temos um afundamento do sinal. Já o ponto b, que é a soma do ponto 3 da fundamental com o 4 da harmônica, causa um pico no sinal.



(Capelli, 2013)

8

kroton
paixão por educar



Aula 9

Distorção Harmônica

As harmônicas, além da ordem, têm sequência positiva, negativa ou nula, chamadas homopolares. As mais comuns e prejudiciais na indústria são as harmônicas de ordem ímpar (3º, 5º, 7º etc.).

Tabela 4.3 - Ordem, frequência e sequência das harmônicas

Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	n*60	-

(Capelli, 2013)

Fonte: Procobra - Instituto Brasileiro do Cobre, 2001

Teoricamente até o infinito as harmônicas podem chegar, mas na prática a influência delas a partir da 13ª ordem é desprezível.

9

kroton
paixão por educar



Aula 9

Distorção Harmônica

THD (taxa de distorção harmônica total)

A THD representa o grau de distorção total em relação à componente fundamental.

Pode ser calculada com a seguinte fórmula:

$$THD = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 \dots + (h_n)^2}}{h_1}$$

O valor h_1 corresponde à amplitude (corrente ou tensão) na frequência fundamental, h_2 , h_3 e as demais são amplitudes das harmônicas.

10

kroton
paixão por educar



Aula 9

Distorção Harmônica

THD (taxa de distorção harmônica total)

Por exemplo, calcule a THD de uma senoide cuja análise espectral mostrou os seguintes valores:

$$h_1 = 3,63 \text{ A}$$

$$h_3 = 2,33 \text{ A}$$

$$h_5 = 0,94 \text{ A}$$

$$h_7 = 0,69 \text{ A}$$

$$h_9 = 0,50 \text{ A}$$

$$h_{11} = 0,41 \text{ A}$$

$$h_{13} = 0,33 \text{ A}$$

$$THD = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 \dots + (h_n)^2}}{h_1}$$

Resposta:

$$THD = \frac{\sqrt{2,33^2 + 0,94^2 + 0,69^2 + 0,50^2 + 0,41^2 + 0,33^2}}{3,63} \times 100\%$$

$$THD = 74,5\%$$

Isso é bom ou ruim?

11

kroton
paixão por educar



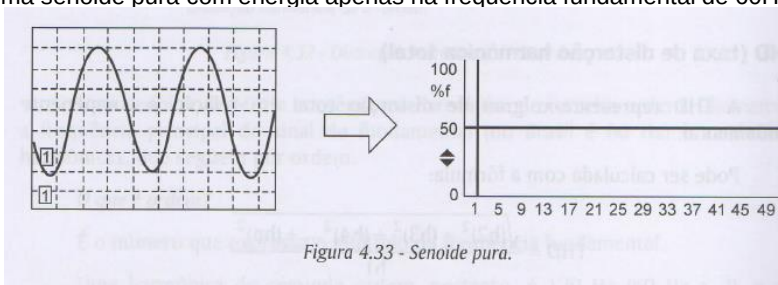
Aula 9

Distorção Harmônica

Depende do sistema. No Brasil não há normas para o limite de harmônicas; uma sugestão é consultar a IEEE 519-2.

Qual seria a situação ideal?

Uma senoide pura com energia apenas na frequência fundamental de 60Hz.



(Capelli, 2013)

12

kroton
paixão por educar



Aula 9

Distorção Harmônica

Efeitos da distorção harmônica

Vários são os problemas gerados:

1. Aquecimento excessivo de cabos

À medida que a frequência do sinal aumenta (harmônicas presentes), cria-se o fenômeno chamado efeito peculiar. Como o próprio nome sugere, a corrente tende a circular pela periferia do condutor, o que resulta em aumento da resistência elétrica e perda Joule. Isso afeta fios, cabos e enrolamentos de motores e transformadores

2. Disparo de dispositivos de proteção

Um sinal com valor eficaz pequeno pode conter altos valores de pico (alto fator de crista), causando o disparo de dispositivos de proteção, como disjuntores e relés térmicos.

13



Aula 9

Distorção Harmônica

Efeitos da distorção harmônica

4. EMI

Altas frequências geram interferências eletromagnéticas que podem ser transmitidas de forma conduzida pelos fios e cabos, ou irradiada pelo ar

5. Queda na tensão eficaz e do fator de potência

Outros problemas gerados pelas harmônicas são queda na tensão nominal da instalação e redução do fator de potência, ambas devido à deformação da fundamental.

14





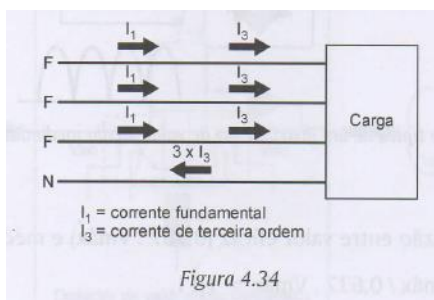
Aula 9

Distorção Harmônica

Efeitos da distorção harmônica

6. Excesso de corrente de neutro

Um dos principais sintomas de presença de harmônicas em uma instalação é o excesso de corrente de neutro. Caso ela seja rica em harmônicas, principalmente de terceira ordem, pelo neutro teremos a soma das correntes harmônicas de cada fase. Em um sistema trifásico teremos no neutro $3 \times I_3$.



(Capelli, 2013)

15

kroton
paixão por educar



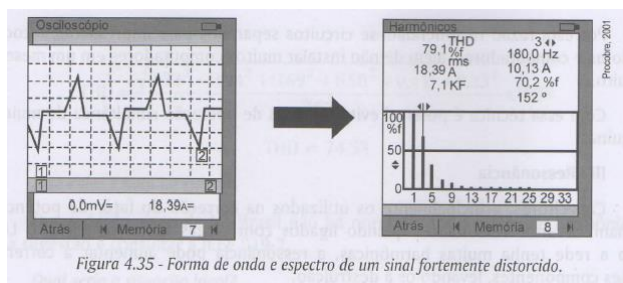
Aula 9

Distorção Harmônica

Efeitos da distorção harmônica

6. Excesso de corrente de neutro

Para quem estiver em campo este é um grande indício de presença de harmônicas. Caso tenhamos uma corrente atípica (maior) de neutro, podemos utilizar um osciloscópio para verificar se a onda está deformada. Estando há harmônicas. É comum, encontrarmos situações tão ruins como o da figura a seguir



16

kroton
paixão por educar



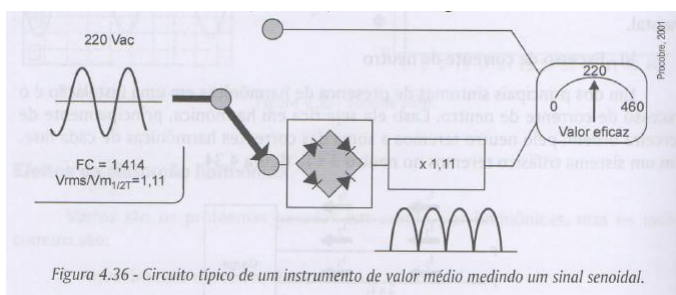
Aula 9

Distorção Harmônica

Multímetro True RMS x Convencional

Um cuidado especial deve ser tomado ao analisarmos a rede elétrica em campo, sendo o valor eficaz real.

Multímetros convencionais utilizam o coeficiente 1,11 que corresponde ao valor médio de um semiciclo (retificado de senoide).



(Capelli, 2013)

kroton
paixão por educar



Aula 9

Distorção Harmônica

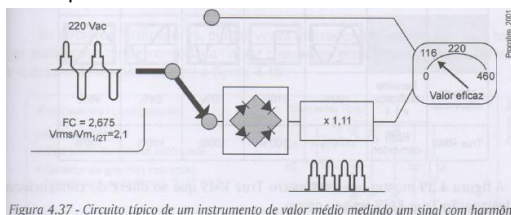
Multímetro True RMS x Convencional

Por que 1,11?

É a razão entre valor eficaz ($0,707 \cdot V_{\text{máx}}$) e médio ($0,637 \cdot V_{\text{máx}}$).

Assim: $(0,707 \cdot V_{\text{máx}}) / (0,637 \cdot V_{\text{máx}}) = 1,11$

Esse valor só serve para sinais puramente senoidais. Do contrário, por exemplo, um valor que deveria ser 220V e indicado como 116V. O mesmo ocorre com a corrente, e é por esse motivo que podemos encontrar em campo dispositivos de proteção que desarmam, aparentemente com uma corrente menor que a nominal. Na verdade, há excesso de corrente que o multímetro convencional não está medindo.



18

kroton
paixão por educar



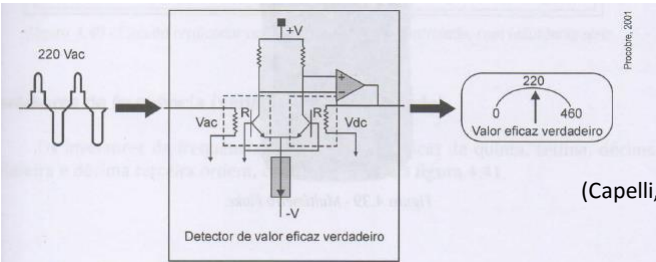
Aula 9

Distorção Harmônica

Multímetro True RMS x Convencional

O que fazer?

Utilizar multímetro TRUE RMS, pois é capaz de prover uma leitura precisa, independentemente da forma de onda. Nele a tensão é convertida em calor, e essa quantidade de calor altera o equilíbrio de um amplificador diferencial, medindo a tensão eficaz.



(Capelli, 2013)

Figura 4.38 - Circuito de entrada típico de um instrumento de valor eficaz verdadeiro.

19



Aula 9

Distorção Harmônica

Multímetro True RMS x Convencional

Qual o erro entre um multímetro convencional e um TRUE RMS?

Dependerá da forma de onda

Tabela 4.4 - Comparação das diferenças segundo o tipo de instrumento

Tipo de multímetro	Circuito	Senoide	Onda quadrada	Onda distorcida	Dimmer de abajur	Onda triangular
Método referencial	Senoide retificada x 1,1	100%	110%	60%	84%	96%
True RMS	RMS converter	100%	100%	100%	100%	100%

(Capelli, 2013)

20





Aula 9

Distorção Harmônica

Vilões das harmônicas

Os circuitos chaveados são os grandes vilões causadores de harmônicas. Cada tipo gera harmônicas em ordem características

1. Retificadores e carregadores de bateria

Os circuitos retificadores, muitas vezes utilizados em carregadores de bateria, com ponte totalmente controlada (SCRs) costumam gerar harmônicas mais intensas de quinta ordem, como na figura:

21

kroton
parando por educar

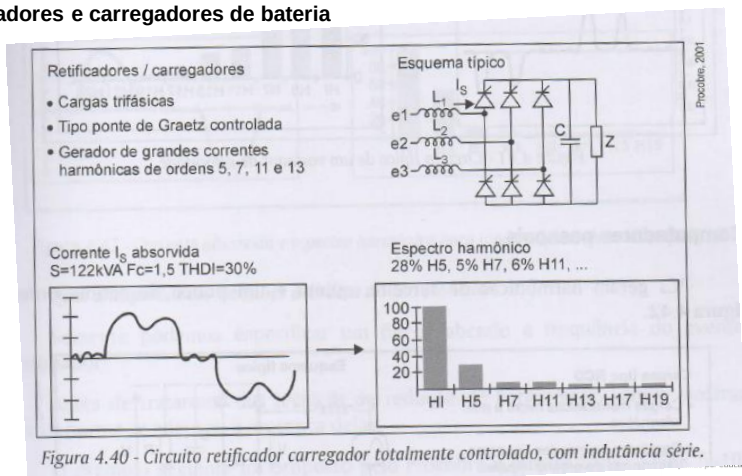


Aula 9

Distorção Harmônica

Vilões das harmônicas

1. Retificadores e carregadores de bateria



(Capelli, 2013)



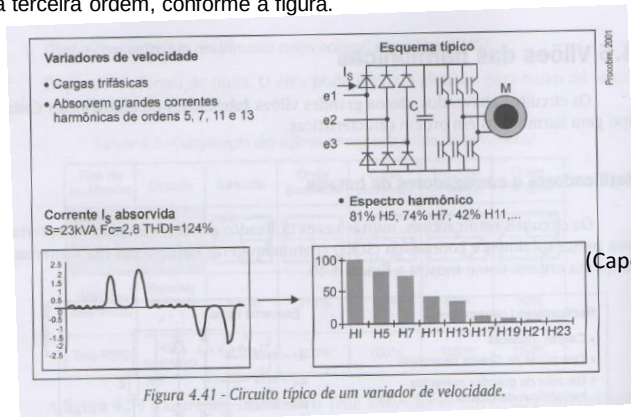
Aula 9

Distorção Harmônica

Vilões das harmônicas

2. Inversores de frequência (variadores de velocidade)

Os inversores de frequência provocam harmônicas de quinta, sétima, décima primeira e décima terceira ordem, conforme a figura.



(Capelli, 2013)

kroton
 paixão por educar

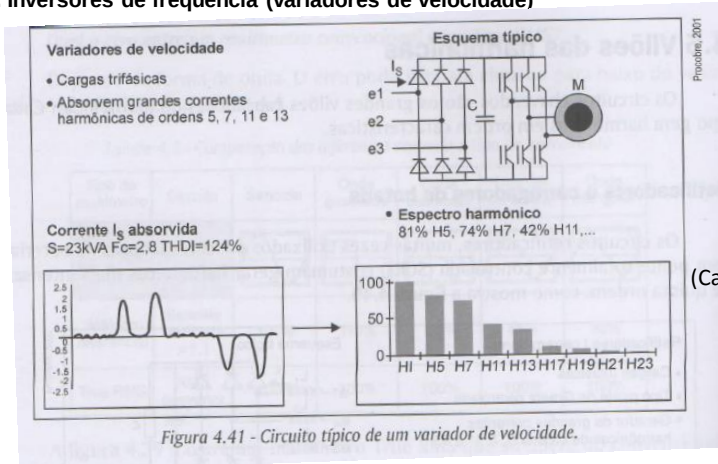


Aula 9

Distorção Harmônica

Vilões das harmônicas

2. Inversores de frequência (variadores de velocidade)



(Capelli, 2013)

kroton
 paixão por educar



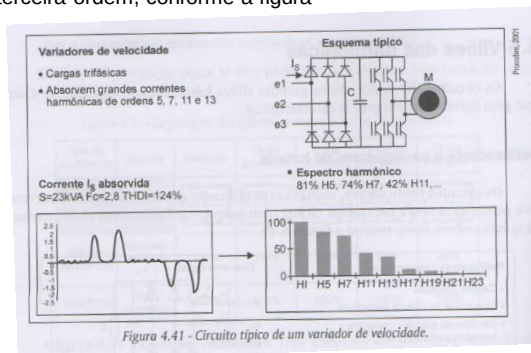
Aula 9

Distorção Harmônica

Vilões das harmônicas

2. Inversores de frequência (variadores de velocidade)

Os inversores de frequência provocam harmônicas de quinta, sétima, décima primeira e décima terceira ordem, conforme a figura



(Capelli, 2013)

25

kroton
paixão por educar



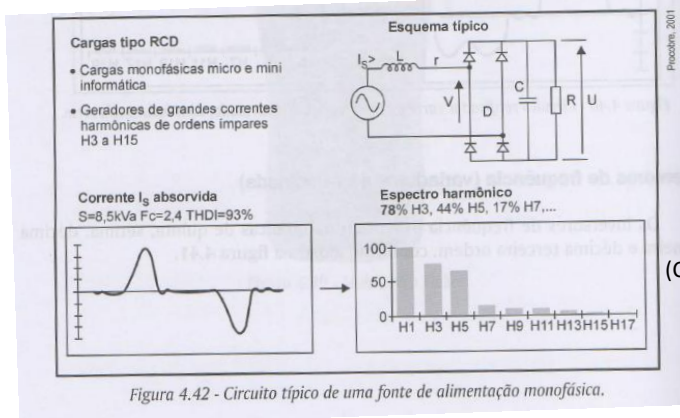
Aula 9

Distorção Harmônica

Vilões das harmônicas

3. Computadores Pessoais

PCs geram harmônicas de terceira, quinta e um pouco de sétima ordem



(Capelli, 2013)

kroton
paixão por educar

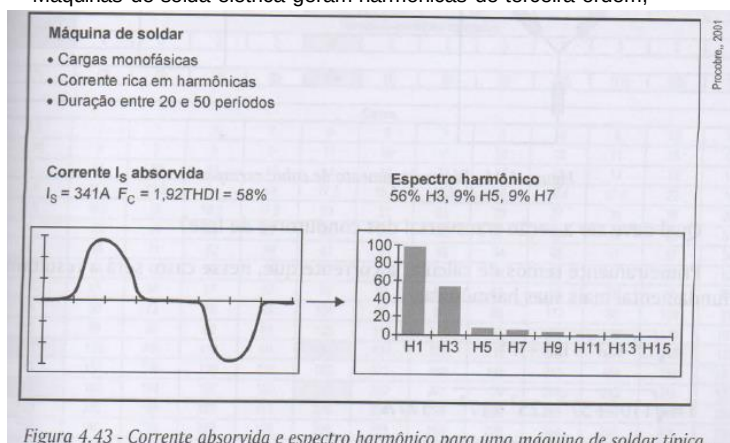


Aula 9

Distorção Harmônica

4. Máquinas de Solda

Máquinas de solda elétrica geram harmônicas de terceira ordem;



(Capelli, 2013)



Aula 9

Distorção Harmônica

Qual a importância de saber a ordem da harmônica?

Somente se pode especificar um filtro sabendo a frequência do evento perturbador.

Antes de tratar das técnicas de redução de harmônicas, vamos mostrar como a norma se adaptou a presença delas.

Exemplo com NBR5410 de baixa tensão que a partir de 1997, já contempla o efeito das harmônicas no cálculo da bitola dos cabos de fase e neutro.

Supondo que o circuito tenha as seguintes correntes:

I_1 = fundamental 110 A;

I_3 = 57 A;

I_5 = 25 A;

I_7 = 17 A





Aula 9

Distorção Harmônica

Supondo que o circuito tenha as seguintes correntes:

I_1 = fundamental 110 A;

I_3 = 57 A;

I_5 = 25 A;

I_7 = 17 A

Qual deve ser a seção Transversal dos condutores de fase?

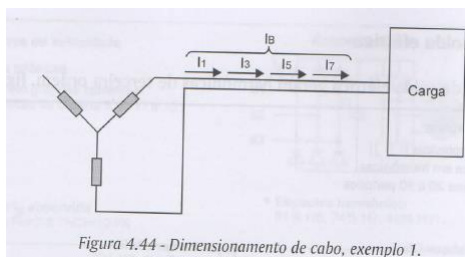


Figura 4.44 - Dimensionamento de cabo, exemplo 1.

Primeiramente temos de calcular a corrente que, nesse caso, será a resultante da fundamental mais suas harmônicas.

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2}$$

$$I = \sqrt{110^2 + 57^2 + 25^2 + 17^2} = 127 \text{ A}$$

(Capelli, 2013)

29

kroton
paixão por educar



Aula 9

Distorção Harmônica

Consultando a tabela 36 da NBR5410 na tabela 4.5, chegamos à seção de 50 mm², pois temos a condição da instalação B1, e a corrente de valor imediatamente superior a 127 A na tabela é 151 A, que leva a Sf=50 mm².

Tabela 4.5 - Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D (tabela 36 da NBR 5410/2004)

Seções nominais (mm²)	Métodos de referência indicados na tabela 33											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52
16	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76	81	67
25	80	73	75	68	104	89	90	80	112	96	104	86
35	99	89	92	83	125	110	111	96	138	119	125	103
50	119	108	110	99	151	134	133	118	168	144	148	122
70	151	135	139	125	192	171	168	149	213	184	183	151
95	182	164	167	149	230	205	202	178	258	223	223	183

kroton
paixão por educar



Aula 9

Distorção Harmônica

- B1= condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente, ou embutido em alvenaria;
- 2 e 3 condutores carregados; temperatura de 70°C no condutor;
- Temperatura ambiente: 30°C para linhas não subterrâneas e 20°C (solo) para linhas subterrâneas;
- Condutores e cabos unipolares e multipolares, isolamento de PVC;

Tabela 4.5 - Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D (tabela 36 da NBR 5410/2004)

Seções nominais (mm²)	Métodos de referência indicados na tabela 33											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52
16	61	56	57	52	76	66	69	62	85	76	81	67
25	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96	104	86
35	99	89	92	83	125	110	111	99	138	119	125	103
50	119	108	110	99	151	134	133	118	168	144	148	122
70	145	136	139	125	182	161	166	149	213	184	183	151
95	182	164	167	150	228	200	206	186	268	233	237	193

(Capelli, 2013)

31



Aula 9

Distorção Harmônica

Distorção Harmônica

Tabela 4.5 - Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D (tabela 36 da NBR 5410/2004)

Seções nominais (mm²)	Métodos de referência indicados na tabela 33											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52
16	61	56	57	52	76	66	69	62	85	76	81	67
25	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96	104	86
35	99	89	92	83	125	110	111	99	138	119	125	103
50	119	108	110	99	151	134	133	118	168	144	148	122
70	151	136	139	125	182	161	166	149	213	184	183	151
95	182	164	167	150	228	200	206	186	268	233	237	193

32



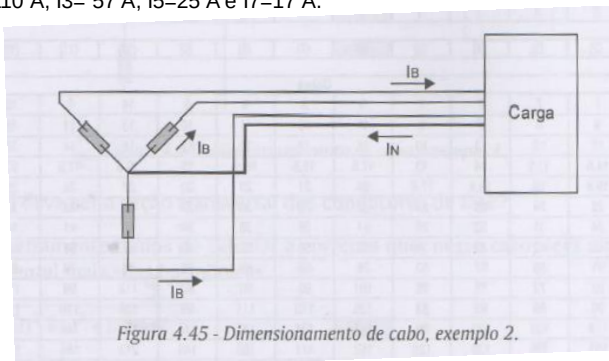


Aula 9

Distorção Harmônica

Outro exemplo, com rede trifásica:

Abaixo temos uma carga alimentada com três fases e um neutro (3F+N), que está alimentado segundo o critério B1 da NBR5410, e com as mesmas correntes. ($I_1=110$ A, $I_3= 57$ A, $I_5=25$ A e $I_7=17$ A.



(Capelli, 2013)

33

kroton
paixão por educar



Aula 9

Distorção Harmônica

No exemplo , como ela é 57 A e temos três fases, a corrente do neutro eficaz é de 171 A. Esse valor é 35% (171/127) maior que a corrente de fase, e 55% (171/110) maior que a fundamental.

Aplicando o fator de correção da tabela 4.6 (tabela 42 da NBR 5410), temos:

$$171/0,8 = 214 \text{ A}$$

(Capelli, 2013)

Tabela 4.6 - Fatores de correção aplicáveis a condutores agrupados em feixe (em linhas abertas ou fechadas) e a condutores agrupados num mesmo plano, em camada única

Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares													Tabela dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≤ 20		
1	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície; embutidos em conduto fechado	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	36 a 39 (métodos A a F)	
2	Camada única sobre parede, piso, ou em bandeja não perfurada ou prateleira	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71		0,70			36 e 37 (método C)	

kroton
paixão por educar



Aula 9

Distorção Harmônica

Tabela 4.6 - Fatores de correção aplicáveis a condutores agrupados em feixe (em linhas abertas ou fechadas) e a condutores agrupados num mesmo plano, em camada única

Ref.	Forma de agrupamento dos condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares												Tabela dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≤ 20	
1	Em feixe: ao ar livre ou sobre superfície; embutidos em conduto fechado	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	36 a 39 (métodos A a F)
2	Camada única sobre parede, piso, ou em bandeja não perfurada ou prateleira	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71		0,70			36 e 37 (método C)

35



Aula 9

Distorção Harmônica

Para aplicar a tabela de bitola do cabo, temos ainda de fazer um artifício, pois não há referência para quatro condutores carregados (3F+N). Assim, consideramos como se fossem dois circuitos separados de dois condutores carregados (coluna B1, 2 cond.) O valor imediatamente acima de 214 é 232 A, o que indica um $S_n = 95\text{mm}^2$. Ou seja, desconsiderando as harmônicas (NBR5410 anterior a 1997), teríamos $S_f = 35\text{mm}^2$ e $S_n = 25\text{mm}^2$. Com a nova revisão que contempla as harmônicas temos $S_f = 70\text{mm}^2$ e $S_n = 95\text{mm}^2$

Tabela 4.5 - Capacidades de condução de corrente, em amperes, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D (tabela 36 da NBR 5410/2004)

Seções nominais (mm²)	Métodos de referência indicados na tabela 33																	
	A1		A2		B1		B2		C		D		Número de condutores carregados					
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)
Cobre																		
0,5	7	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10					
0,75	9	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12					
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	16						
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	16	19,5	17,5	22	18						
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24						
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31						
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	38						
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52						
16	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76	81	67						
25	80	73	75	68	101	88	90	80	112	96	104	86						
35	99	90	92	83	125	110	111	99	138	119	125	103						
50	119	108	110	99	151	134	133	118	168	144	149	122						
70	151	136	139	125	192	171	168	149	213	184	193	151						
95	182	164	167	150	232	207	201	179	258	223	236	179						
120	205	185	188	168	265	236	228	204	294	253	268	204						

(Capelli, 2013)

36





Aula 9

Distorção Harmônica

Tabela 4.5 - Capacidades de condução de corrente, em ampères, para os métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D (tabela 36 da NBR 5410/2004)

Seções nominais (mm²)	Métodos de referência indicados na tabela 33											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52
16	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76	81	67
25	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96	104	86
35	99	89	92	83	125	110	111	99	138	119	125	103
50	119	108	110	99	151	134	133	118	166	144	148	122
70	151	136	139	125	192	171	168	149	213	184	183	151
95	182	164	167	150	232	207	201	179	258	223	216	179
120	210	188	192	172	269	239	236	207	296	254	246	207

37

krol

37



Aula 9

Distorção Harmônica

Técnicas de redução de harmônicas

As harmônicas configuram um problema contemporâneo, ou seja, que surgiu com mais intensidade nos últimos dez anos devido a tecnologia e emprego de circuitos chaveados. Eliminá-las por completo na instalação é algo inviável; a solução é reduzi-las. Basicamente há duas formas de fazer isso, sendo com filtros e transformadores isoladores.

38

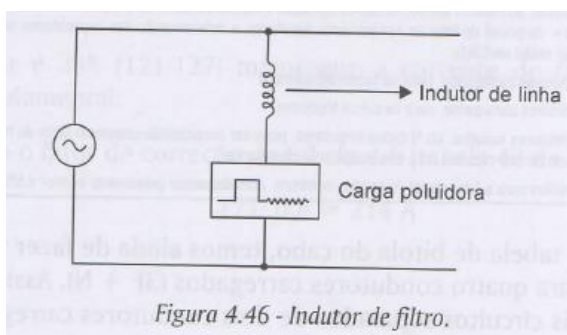


Aula 9

Distorção Harmônica

Filtros

Os filtros para harmônicas podem ser passivos ou ativos. Os filtros passivos são ligados em série ou paralelo com a carga poluidora, impedindo que a sujeira seja transmitida na instalação.



(Capelli, 2013)

39

kroton
paixão por educar

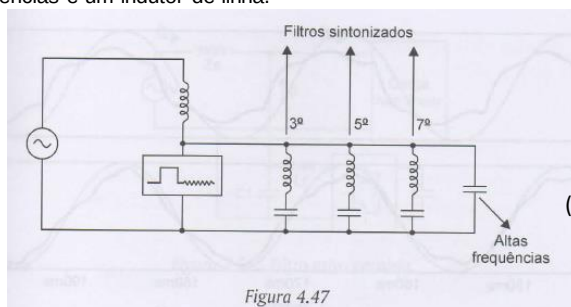


Aula 9

Distorção Harmônica

Filtros

Uma mesma instalação pode conter várias ordens de harmônicas, o que leva à solução abaixo. Filtros passivos sintonizados para cada frequência são ligados em paralelo com a carga. Geralmente são três filtros LC (3º, 5º, 7º), um capacitor para altas frequências e um indutor de linha.



(Capelli, 2013)

40

kroton
paixão por educar

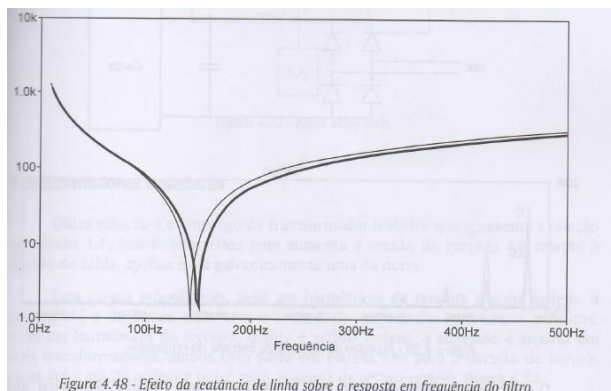


Aula 9

Distorção Harmônica

Filtros

Abaixo temos a reatância do filtro caindo segundo sua frequência sintonizada, eliminando a respectiva harmônica, no exemplo de terceira ordem= 180 Hz.



(Capelli, 2013)

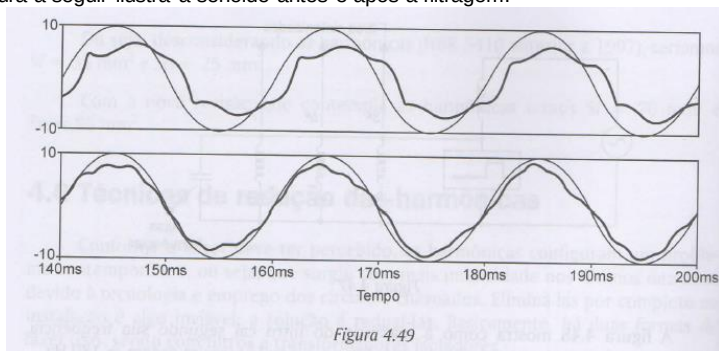


Aula 9

Distorção Harmônica

Filtros

A figura a seguir ilustra a senóide antes e após a filtragem.



(Capelli, 2013)



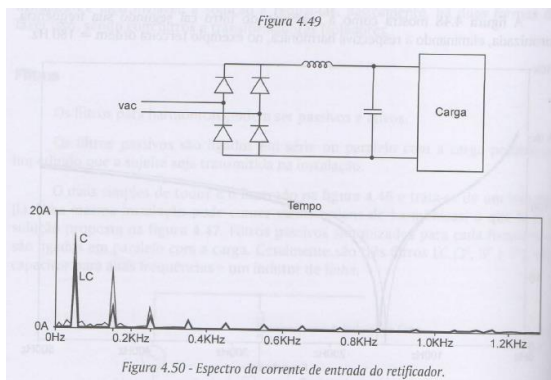


Aula 9

Distorção Harmônica

Filtros

Na figura abaixo temos a análise espectral de um retificador de terceira e quinta harmônicas significativas.



(Capelli, 2013)

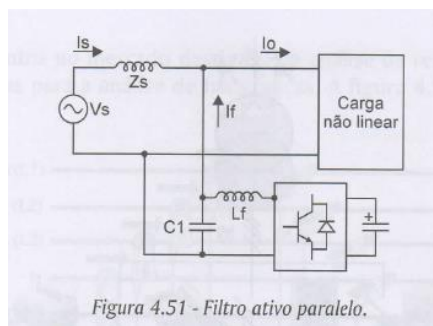
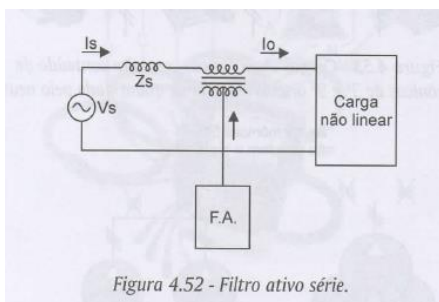


Aula 9

Distorção Harmônica

Filtros

O filtro ativo, mais eficiente que o passivo, é um circuito eletrônico que compensa o efeito da harmônica através da injeção ou dissipação de corrente na linha. Podendo ser em paralelo ou em série à carga.



(Capelli, 2013)

44





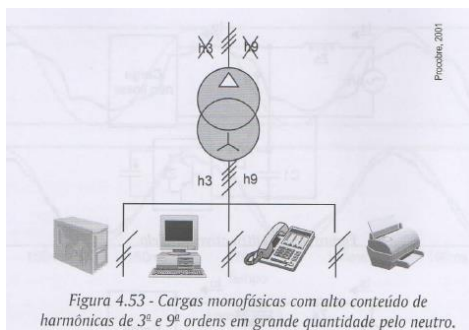
Aula 9

Distorção Harmônica

Transformadores isoladores

É o emprego de transformador isolador que apresenta a relação de tensão 1:1, isto é, não reduz nem aumenta a tensão de entrada em relação à tensão de saída, apenas isola galvanicamente uma da outra.

Para cargas monofásicas, ricas em harmônicas de terceira e nona ordens, a proposta é ligar com o secundário em estrela.



(Capelli, 2013)

45

kroton
paixão por educar

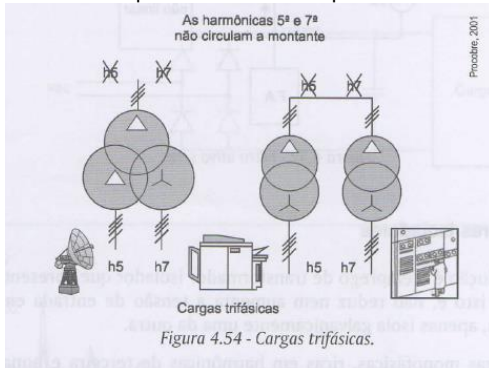


Aula 9

Distorção Harmônica

Transformadores isoladores

Para cargas trifásicas, ricas em harmônicas de terceira, quinta e sétima ordens, a sugestão é separar em dois transformadores, ambos com saída em estrela. Um para o circuito de harmônicas até a quinta ordem e outro para as acima da sétima ordem.



(Capelli, 2013)

46

kroton
paixão por educar



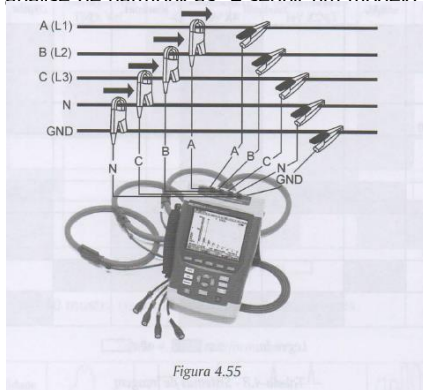
Aula 9

Distorção Harmônica

É preciso um analisador de espectro para detectar harmônicas?

Não.

Há instrumentos no mercado destinados à análise de rede elétrica, com telas (funções) específicas para a análise de harmônicas. A seguir um modelo da Fluke série 430.



(Capelli, 2013)

47

kroton
paixão por educar



Aula 9

Distorção Harmônica

Problemas e soluções com a qualidade da energia elétrica

Foi apresentado um grande número de eventos e técnicas, as tabelas seguintes fazem um resumo dos principais problemas e suas respectivas propostas de solução. Nas tabelas temos as probabilidades de falhas para cada evento nos sistemas de controle e processo. Equipamentos de tecnologia da informação também estão nesse grupo, o mesmo para sistemas de imagem e equipamentos médico- hospitalares.

48

kroton
paixão por educar



Aula 9

Distorção Harmônica

(Capelli, 2013)

Controle de processo

Tabela 4.7 - Controle do processo

Probabilidade de falha	 SAG	 Transitório 2X Vef	 Transitório 4X Vef	 Blackout	 Tensão N/T	 Spike	 Sobretensão
Queima de placas eletrônicas							
Perda de memória							
Perda de ajuste de Drift							
Queima da etapa de potência							
Parada de máquinas							
Queima de fontes de alimentação							
Reset indesejado							
Travamento							

Legenda: sim ☒ não ☐

kroton
paixão por educar



Aula 9

Distorção Harmônica

(Capelli, 2013)

Sistemas de imagem

Tabela 4.8 - Sistemas de imagem

Probabilidade de falha	 SAG	 Transitório 2X Vef	 Transitório 4X Vef	 Blackout	 Tensão N/T	 Spike	 Sobretensão
Queima de placas							
Disparo de "low voltage"							
Queima na fonte de alta tensão							
Resolução pobre							
Interrupção							
Queima da fonte de alimentação							
Reset indesejado							
Travamento							

Legenda: sim ☒ não ☐

kroton
paixão por educar



Aula 9

Distorção Harmônica

Equipamentos odonto- médico- hospitalares (Capelli, 2013)

Tabela 4.9 - Equipamentos odonto-médico-hospitalares

Probabilidade de falha	 SAG	 Transitório 2X Vef	 Transitório 4X Vef	 Blackout	 Tensão N/T	 Spike	 Sobretensão
Queima de placas eletrônicas							
Erro de medida							
Travamento							
Baixa resolução							
Reset indesejado							
Queima das fontes de alimentação							

Legenda: sim ☒ não ☐

51

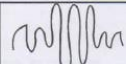


Aula 9

Distorção Harmônica

Transformadores (Capelli, 2013)

Tabela 4.10 - Transformadores

Probabilidade de falha	 Harmônicas	 Transitório	 Corrente não senoidal	 Sobretensão
Queima dos enrolamentos				
Calor excessivo				
Falta de estabilidade de tensão				
Saturação				

Legenda: sim ☒ não ☐

52





Aula 9

Distorção Harmônica

Soluções

(Capelli, 2013)

Tabela 4.11 - Soluções

Solução							
	SAG X	Transitório 2X Vef	Harmônicas	Blackout	Tensão N/T	Spike	Sobretensão
Readequar as instalações							
Transformador isolador							
Regulador de tensão							
Supressores (varistor, centelhador)							
Filtros de linha							
Filtros ativos							
Gerador							
Shortbreak							
Nobreak on-line							

Legenda: sim ☒ não ☐

53



Aula 9

Distorção Harmônica

Normas referentes à qualidade da energia elétrica

IEC 61000-4-7: descreve uma técnica de medição padrão para harmônicas.

IEEE 519 (1992): prática recomendada pela IEEE utilizada principalmente por concessionárias de energia nos EUA. Descreve níveis aceitáveis de harmônicas para o ponto de entrega pela concessionária.

EN50160: é uma norma que cobre flicker, inter-harmônicas e variações de tensão.

54





Bibliografia desta aula:

1. Energia Elétrica – Qualidade e Eficiência para aplicações Industriais. Autor: Alexandre Capelli. 1ª edição. 2013.
2. Distúrbios da Energia Elétrica. Autor Edson Martinho. 3ª edição. 2009.

55



56