



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

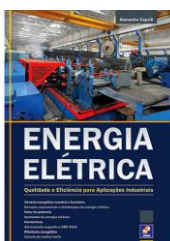


Aula 10

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!



Aula 10

Desequilíbrio de Tensão

Ocorre em sistemas trifásicos podendo ocasionar aquecimento em um motor.

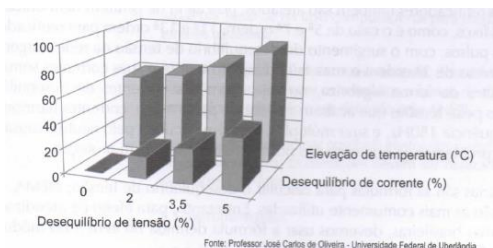
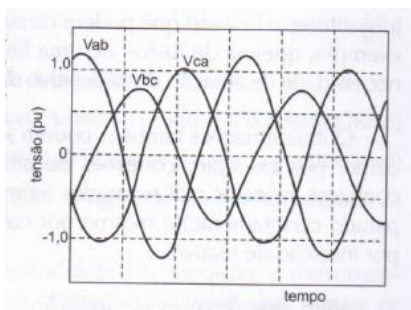


Figura 3.33 - Operação de um motor de indução trifásico.

3

kroton
paixão por educar



Aula 10

Gera tensões de sequência negativa no sistema de distribuição, o que pode afetar a cadeia de energia elétrica. Outra consequência é a variação de temperatura, ocasionando aumento de temperatura e vida útil diferente para o condutor, queima de um fusível por fase, criação de uma falta de fase, que gera a necessidade de atuação do dispositivo de proteção....

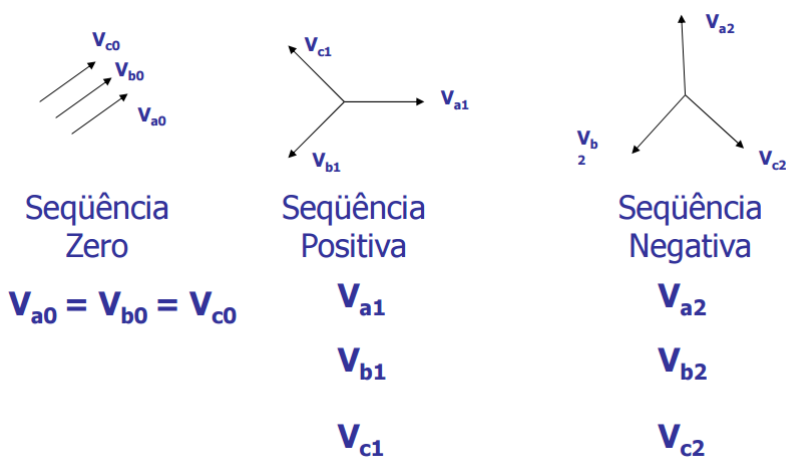
Sequência de tensão:

- ❑ Constitui-se em uma transformação linear de componentes de fase em um novo conjunto de componentes chamadas *componentes simétricas*;
- ❑ Componentes de sequência zero:
 - ✚ consiste em três fasores de iguais magnitude e fase angular;
- ❑ Componentes de sequência positiva:
 - ✚ consiste em três fasores de igual magnitude e defasados de 120° e na mesma sequência de fases do sistema original;
- ❑ Componentes de sequência negativa:
 - ✚ consiste em três fasores de igual magnitude e defasados de 120° e em sequência de fases contrária à do sistema original

kroton
paixão por educar



Aula 10



5


 kroton
 paixão por educar


Aula 10

Distorção Harmônica

As harmônicas, além da ordem, têm sequencia 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	-

Fonte: Procobro - Instituto Brasileiro do Cobre, 2001

(Capelli, 2013)

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

6


 kroton
 paixão por educar



Aula 10

Desequilíbrio de Tensão

Várias são as fórmulas para calcular o desequilíbrio de tensão, IEEE e IEC são as mais comumente utilizadas. Entretanto, para efeito de atendimento às normas brasileiras, devemos usar a fórmula definida no item 5 do módulo 8 do Prodist.

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100$$

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$$

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}$$

Onde:

- FD - Fator de desequilíbrio
- V_- - Magnitude da tensão de sequência negativa (RMS)
- V_+ - Magnitude da tensão de sequência positiva (RMS)
- V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} - Magnitude das tensões trifásicas de linha (RMS)

7

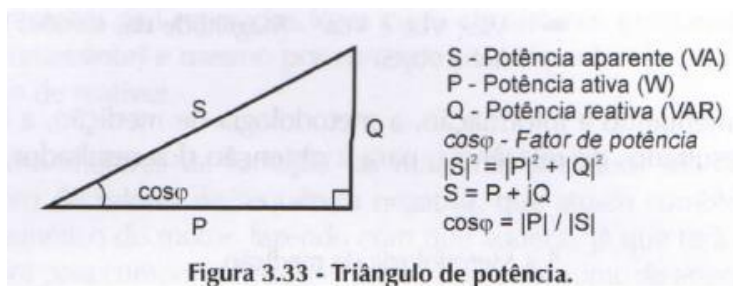
kroton
paixão por educar



Aula 10

Redução do Fator de Potência

É o ângulo de defasagem entre a potência ativa e a aparente no triângulo de potências.



8

kroton
paixão por educar



Aula 10

Redução do Fator de Potência

- **Potência aparente:** é o valor total da potência que será utilizada de uma fonte geradora, ou seja, é a soma vetorial da potência útil (P) e reativa (Q). Por ser a soma vetorial precisa de módulo e ângulo, que são dados pela expressão seguinte:
 - Módulo: $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$
 - Ângulo: $\phi = \arctg(Q/P)$
 - A unidade da potência aparente é o VA - volt-ampère.
 - **Potência ativa ou útil:** é a componente da potência aparente S, que é utilizada por um equipamento para realizar trabalho, ou seja, é a potência transformada integralmente em trabalho. É conhecida por P e sua unidade é o watt. O valor da potência útil é obtido da seguinte maneira:
 - Em sistemas monofásicos, $P = U \cdot I \cdot \cos\phi$
 - Em sistemas trifásicos: $P = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos\phi$ ou $P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos\phi$
- Em que:
- U_f = tensão de fase
 - I_f = corrente de fase
 - U_L = tensão de linha

9



Aula 10

Redução do Fator de Potência

- **Potência reativa:** ao contrário da potência útil, a potência reativa é a componente da potência aparente que não realiza trabalho. Aparece no circuito devido às características das impedâncias dos componentes da rede e dos equipamentos ligados a ela. Sua unidade é o var, ou volt-ampère reativo e tem o valor obtido pelas equações seguintes:
 - Em sistemas monofásicos $Q = U \cdot I \cdot \sin\phi$
 - Em sistemas trifásicos: $Q = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \sin\phi$ ou $Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin\phi$

10



Aula 10

Redução do Fator de Potência

Vamos a um exemplo. Imagine que em dois circuitos monofásicos há um consumo de potência ativa de 1000W, porém o primeiro traz um fator de potência de 0,5 e o outro de 0,85. Avaliando pelos cálculos, o primeiro circuito precisa extrair da rede 2000VA para obter os 1000W de trabalho, enquanto o circuito com fator de potência 0,85 precisa extrair somente 1176,5VA. Isso significa que a eficiência do circuito em termos de utilização da energia será dada pelo fator de potência.

Este simples exemplo faz refletir sobre a necessidade de controlar o fator de potência de uma instalação elétrica, pois o fato de ser extraído um valor maior da rede e não utilizá-lo, acarreta vários outros problemas, como o redimensionamento de condutores, dispositivos de proteção, transformadores etc. Imagine que no primeiro caso do exemplo, um transformador precisa ter capacidade de 2000VA e, conseqüentemente, os condutores devem ser de maior seção para suportar a corrente maior, ao passo que, no segundo caso, o transformador pode ter potência menor (1176,5VA) e os condutores diminuem, ou então a potência restante pode ser usada para alimentar outro circuito.

11



 paixão por educar


Aula 10

Redução do Fator de Potência

Em função desta condição, os países se preocuparam em estabelecer os valores mínimos de fator de potência que um circuito pode operar de forma a coibir o abuso, e então permitir que os sistemas sejam melhor aproveitados.

	Espanha 0,92		Bélgica 0,95
	Coreia 0,93		Alemanha 0,96
	França 0,93		Suíça 0,96
	Portugal 0,93		Argentina 0,95

No Brasil, foi estabelecido o valor de 0,92; indutivo durante o dia e capacitivo durante a madrugada (Prodint- módulo 8- item 3). A resolução ainda define que a empresa de energia pode ou não cobrar esse ajuste de fator de potência em baixa, ficando a critério dela.

12



 paixão por educar



Aula 10

Redução do Fator de Potência

Com relação às consequências de um baixo fator de potência, além da multa aplicada pela concessionária (a instalação de vários equipamentos com baixo fator de potência pode afetar o circuito como um todo), as perdas são os pontos mais críticos, pois é desperdício de energia.

Quanto maior o número de equipamentos com baixo fator de potência, maior a chance desse circuito possuir fator de potência baixo.

Quanto menor o fator de potência de um circuito, maior é a necessidade da capacidade do transformador e maior a seção dos cabos para conduzir toda essa energia.

13



Aula 10

Redução do Fator de Potência

Seção relativa	Fator de potência
1,00	1,00
1,23	0,90
1,56	0,80
2,04	0,70
2,78	0,60
4,00	0,50
6,25	0,40
11,10	0,30

Figura 3.35 - Relação fator de potência x seção nominal do condutor.

14





Aula 10

Redução do Fator de Potência

Tomando como base a seção 1 para um circuito com fator de potência 1 (hipotético), se esse fator cai a 0,90, a seção do condutor deve aumentar 23%; se esse fator de potência cair a 0,7, a seção do condutor deve dobrar. Se for a 0,5, quadruplica e assim por diante.

Outro exercício é o de multa aplicada pela concessionária. A Tabela 3.5 relaciona o fator de potência com o ângulo ϕ e a porcentagem de acréscimo na conta de energia.

Tabela 3.5 - Relação fator de potência x ângulo x acréscimo na conta de energia

dPF = $\cos \phi$	Ângulo ϕ	Acréscimo %
0,95	18,19	0,00
0,92	23,07	0,00
0,90	25,84	2,20
0,85	31,79	8,30
0,80	36,87	15,0
0,75	41,41	22,7
0,70	45,57	31,4
0,65	49,46	41,5

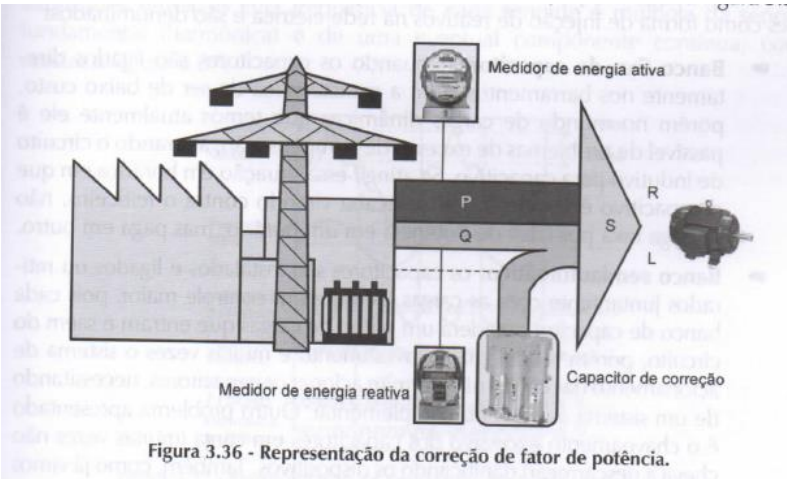
Fonte: Apresentação Marcio Rosa - WEG - seminário Qualidade da energia 2008.

15



Aula 10

Correção



16





Aula 10

Correção

A IEEE 141-1993 apresenta as formas mais usuais para aplicação de capacitores como forma de injeção de reativos na rede elétrica e são denominados:

- **Banco fixo de capacitores:** quando os capacitores são ligados diretamente nos barramentos. Tem a característica de ser de baixo custo, porém no mundo de cargas dinâmicas que temos atualmente ele é passível de problemas de excesso de compensação, alterando o circuito de indutivo para capacitivo. Se atingir essa situação em horários em que o capacitivo é taxado, o feitiço acaba virando contra o feiticeiro, não se paga taxa por fator de potência em um horário, mas paga em outro.
- **Banco semiautomático:** os capacitores são instalados e ligados ou retirados juntamente com as cargas. Permite um controle maior, pois cada banco de capacitor atenderá um grupo de cargas que entram e saem do circuito, porém requer maior investimento e muitas vezes o sistema de acionamento das cargas não permite acionar os capacitores, necessitando de um sistema auxiliar, ou complementar. Outro problema apresentado é o chaveamento excessivo dos capacitores em carga (muitas vezes não chega a descarregar) danificando os dispositivos. Também, como já vimos no item Afundamento de Tensão, podem ser a causa desse distúrbio.
- **Banco de acionamento automático de capacitores:** naturalmente de custo mais elevado, é o sistema mais indicado para o perfil da maioria das cargas atualmente (muito dinâmicas). O banco automático é dividido em pequenos bancos que são acionados por sistemas independentes.

kroton
paixão por educar



Aula 10

Harmônicas

Termo utilizado para a distorção de onda senoidal, descaracterizando-a. Definição dada pelo físico e matemático Fourier.

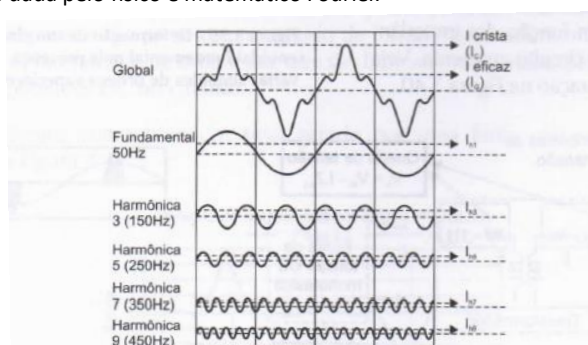


Figura 3.37 - Representação da decomposição de um sinal distorcido.

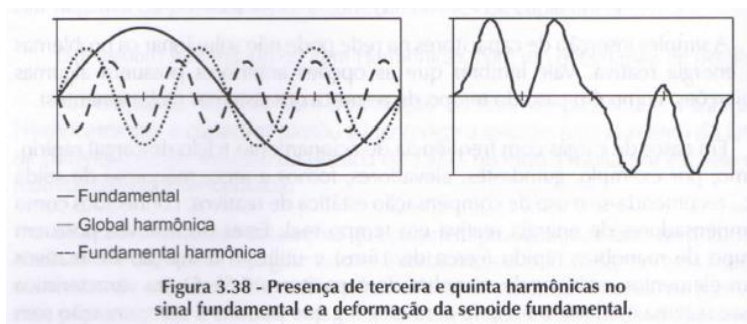
kroton
paixão por educar



Aula 10

Harmônicas

O somatório de várias frequências em uma senoide faz com que a forma de onda inicial seja distorcida.



19

kroton
paixão por educar



Aula 10

Harmônicas

Outro exemplo é mostrado na Figura 3.39.

A deformação do sinal senoidal pode ocorrer tanto no sinal de corrente como no sinal de tensão, portanto são tratados como tais, ou seja, harmônica de corrente e harmônica de tensão. A distorção harmônica de tensão aparece quando há a circulação de corrente harmônica no circuito em função das impedâncias que o circuito apresenta. Veja a representação na Figura 3.40.

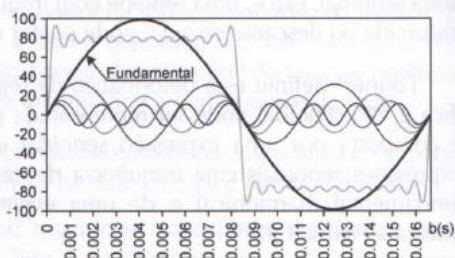


Figura 3.39 - Deformação de um sinal senoidal fundamental pela presença de várias senoides de ordens superiores.

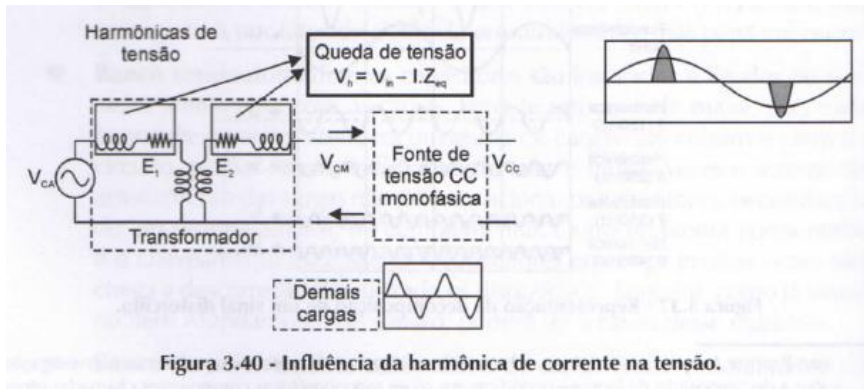
20

kroton
paixão por educar



Aula 10

Harmônicas



21

kroton
paixão por educar



Aula 10

Harmônicas

A resposta é simples: as harmônicas são geradas por cargas não lineares, por isso esse fenômeno é relativamente recente, ou melhor, os efeitos da harmônica são recentes. Na década de 1980, as instalações elétricas começaram a sofrer os efeitos das harmônicas, pois a partir dessa época começou nas indústrias o uso de automação de forma mais intensa em busca de menores custos de produção, maiores produtividades e menores perdas por problemas de qualidade dos produtos, que dependiam então da interferência humana, que é instável. Foi nessa época que o número de equipamentos não lineares aumentou, percebendo-se que as formas de onda não estavam mais senoidais; assim os equipamentos alimentados pela rede começaram a sofrer, pois dependiam da senoide para se alimentar e esta vinha deformada. Alguns autores chamam essa deformação de poluição da instalação elétrica.

22

kroton
paixão por educar



Aula 10

Harmônicas

Avaliando a deformação pelo Teorema de Fourier, verificamos que aquele sinal periódico poderia ser decomposto em senoides com amplitudes diferentes da fundamental e frequências múltiplas do valor original, que no Brasil é basicamente 60Hz. Foi neste caso que se começou a verificar que algumas deformações eram causadas por sinais de 3ª ordem (180Hz), outros de 5ª ordem (300Hz) e outros de 7ª, 9ª e assim por diante. Também se observou que as ordens poderiam estar compostas no mesmo sinal, como foi mostrado anteriormente na composição da terceira e quinta ordens. Observamos que as ordens ímpares estão presentes no estudo de forma mais comum, mas também existem as harmônicas de ordem par, que são basicamente geradas pela presença de componentes DC no circuito.

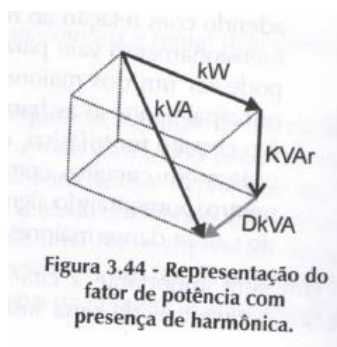
23



Aula 10

Harmônicas

Valor médio, valor eficaz e fp são modificados, pois ganha mais uma dimensão, a carga terá, além das potências ativas e reativas, uma potência imposta pela distorção que chamaremos de D (potência da distorção harmônica) e será expressa em DkVA.



24





Aula 10

Harmônicas

A potência aparente aumenta, portanto todos os cálculos anteriormente executados perdem a validade. A potência aparente passa a ser calculada levando em consideração o novo parâmetro e será assim:

$$kVA = \sqrt{kVAR^2 + kW^2 + DkVA^2}$$

Veja que o novo parâmetro foi acrescido e com isso a potência aparente aumenta muitas vezes de forma significativa, podendo chegar a dobrar de valor.

O cálculo do fator de potência já não pode ser mais dado pelo cosseno do ângulo formado pelas potências ativa e aparente, e sim levar em consideração as harmônicas, como mostra a fórmula seguinte:

$$FP = \frac{\cos(\phi^1)}{\sqrt{1 + THD(I)^2}}$$

25



Aula 10

Harmônicas

Em que THDi é a taxa de distorção harmônica de corrente dada pelo somatório dos valores de cada ordem, como mostramos a seguir.

O valor de cada ordem de harmônica é dado pela expressão $THD\% = h_i/h_1 \cdot 100$, o que significa que a taxa de distorção harmônica individual para uma determinada ordem é igual ao valor da amplitude do sinal (da ordem que se deseja) dividido pela amplitude do sinal fundamental (60Hz) vezes 100 para que o valor obtido seja uma porcentagem do valor fundamental.

Obtido cada valor separadamente, temos a taxa de distorção total THD dada pela raiz quadrada da soma dos quadrados de cada ordem presente no circuito, dividido pelo valor da amplitude do sinal de 60Hz (fundamental) e multiplicado por 100 para que valor total seja referenciado a uma porcentagem do valor da amplitude da fundamental.

$$THD = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}}{h_1} \times 100\%$$

26



Aula 10

Harmônicas

De forma macro, há duas maneiras de reduzir os efeitos das correntes harmônicas. A primeira é atuar na origem do problema, ou seja, construir ou adquirir equipamentos que tenham filtros, ou outros artifícios que minimizem a geração das harmônicas internamente, como, por exemplo, os reatores para lâmpadas de descargas que são obrigados, por norma da ABNT NBR 14418/2011, a gerar somente um determinado nível de distorção harmônica, por exemplo, 7% no máximo.

Com esta atitude se reduz a geração e, conseqüentemente, os problemas. Mas esta é uma forma mais difícil de trabalhar, já que na maioria das vezes o parque está instalado, e o custo para a substituição dos equipamentos não lineares seria inviável.

27

kroton
 paixão por educar


Aula 10

Harmônicas

O item 4 do módulo 8 do Prodist define os índices de harmônicas que devem ser utilizados como parâmetros pelas distribuidoras de energia elétrica e naturalmente tomados como base pelos consumidores. Em linhas gerais, o item mostra na tabela 3 os seguintes valores de distorção harmônica total de tensão:

Tabela 3.6 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} < V_N \leq 13.8\text{kV}$	8
$13.8\text{kV} < V_N \leq 69\text{kV}$	6
$69\text{kV} < V_N \leq 13.8\text{kV}$	3

28

kroton
 paixão por educar



Aula 10

Harmônicas

Os índices individuais também devem ser controlados conforme a Tabela 3.7, baseada no Prodist.

Tabela 3.7 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_N \leq 1\text{kV}$		$1\text{kV} < V_N \leq 13.8\text{kV}$	$13.8\text{kV} < V_N \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} < V_N \leq 230\text{kV}$
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	1.56	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

29



Aula 10

Inter- Harmônicas

O distúrbio inter-harmônico é caracterizado pela presença de formas de onda de tensão ou corrente com valores que não são múltiplos da frequência fundamental. Podem aparecer de forma discreta ou com uma larga faixa espectral, em diferentes classes de tensão.

São distúrbios pouco conhecidos e estudados mas que afetam os sinais de portadoras de sinais e também a visualização em sinais de display como TVs analógicas, induzindo os conhecidos flickers.

Alguns estudos mostram que os inter- harmônicos são produzidos por equipamentos a arco, motores de indução, inversores e conversores estáticos, entre outros.

30

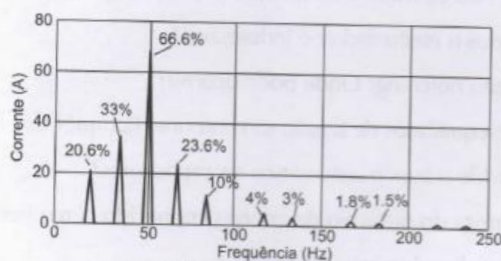




Aula 10

Inter- Harmônicas

A exemplo das harmônicas, as inter-harmônicas possuem ordens que são dadas pela taxa em relação à frequência fundamental, como, por exemplo, 1.70 (102Hz, referenciando a 60Hz), 3.20 (192Hz) etc.



Fonte: Tradução de LPQI - Power Quality Application Guide - Interharmonics 3.1.1.

Figura 3.45 - Circuito com inter-harmônicas, considerando frequência padrão 50Hz.

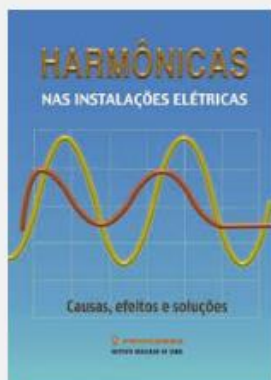
31

kroton
paixão por educar



Aula 10

Livros



32

kroton
paixão por educar



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.
3. http://www.cpdee.ufmg.br/~selenios/Qualidade/EEE959_1a.pdf

33

