

Aula 09 – Indicadores de Distorção Harmônica Parte 1



Prof. Heverton Augusto Pereira
Prof. Mauro de Oliveira Prates

Universidade Federal de Viçosa - UFV
Departamento de Engenharia Elétrica - DEL
Gerência de Especialistas em Sistemas Elétricos de Potência – Gesep

heverton.pereira@ufv.br

www.gesep.ufv.br
TEL: +55 (31) 3899-3266

Introdução

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ **Indicadores harmônicos** são definidos com o propósito de mensurar a conformidade senoidal da tensão e corrente e o desempenho da instalação.
- ✓ **A técnica de componentes simétricas**, em sistemas desequilibrados e não linear, é aplicado, gerando **para cada harmônico h** , de uma dada sequência de fase, **um conjunto de componentes simétricas**.

Harmônicos em Sistemas Trifásicos Equilibrados

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Com a presença de cargas não lineares em SEP equilibrados, as componentes harmônicas apresentam sequência **positiva, negativa e zero**.

$$v_a(t) = V_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + V_2 \cos(2\omega_1 t + \varphi_2) + V_3 \cos(3\omega_1 t + \varphi_3) \\ + V_4 \cos(4\omega_1 t + \varphi_4) + V_5 \cos(5\omega_1 t + \varphi_5) + V_6 \cos(6\omega_1 t + \varphi_6) \\ + V_7 \cos(7\omega_1 t + \varphi_7) + \dots$$

$$v_b(t) = V_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 - 120^\circ) + V_2 \cos(2\omega_1 t + \varphi_2 + 120^\circ) + V_3 \cos(3\omega_1 t + \varphi_3) \\ + V_4 \cos(4\omega_1 t + \varphi_4 - 120^\circ) + V_5 \cos(5\omega_1 t + \varphi_5 + 120^\circ) + V_6 \cos(6\omega_1 t + \varphi_6) \\ + V_7 \cos(7\omega_1 t + \varphi_7 - 120^\circ) + \dots$$

$$v_c(t) = V_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + 120^\circ) + V_2 \cos(2\omega_1 t + \varphi_2 - 120^\circ) + V_3 \cos(3\omega_1 t + \varphi_3) \\ + V_4 \cos(4\omega_1 t + \varphi_4 + 120^\circ) + V_5 \cos(5\omega_1 t + \varphi_5 - 120^\circ) + V_6 \cos(6\omega_1 t + \varphi_6) \\ + V_7 \cos(7\omega_1 t + \varphi_7 + 120^\circ) + \dots$$

Harmônicos em Sistemas Trifásicos Equilibrados

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Com a presença de cargas não lineares em SEP **equilibrados**, as componentes harmônicas apresentam **sequência positiva, negativa e zero.**

h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Seq.	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0
h	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Seq.	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0
h	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
Seq.	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0
h	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Seq.	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0

As harmônicas da 3^a à 25^a ordens são as mais comuns em sistemas de distribuição.

Harmônicos em Sistemas Trifásicos Equilibrados

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Na tensão de linha, as **componentes triplas desaparecem.**

$$\begin{aligned}v_{ab}(t) &= v_a(t) - v_b(t) \\ &= \sqrt{3} \left[V_1 \cos(\omega_1 + \varphi_1 + 30^\circ) + V_2 \cos(2\omega_1 + \varphi_2 - 30^\circ) + 0 \right. \\ &\quad \left. + V_4 \cos(4\omega_1 + \varphi_4 + 30^\circ) + V_5 \cos(5\omega_1 + \varphi_5 - 30^\circ) + 0 \right. \\ &\quad \left. + V_7 \cos(7\omega_1 + \varphi_7 + 30^\circ) + \dots \right]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}v_{bc}(t) &= v_b(t) - v_c(t) \\ &= \sqrt{3} \left[V_1 \cos(\omega_1 + \varphi_1 - 90^\circ) + V_2 \cos(2\omega_1 + \varphi_2 + 90^\circ) + 0 \right. \\ &\quad \left. + V_4 \cos(4\omega_1 + \varphi_4 - 90^\circ) + V_5 \cos(5\omega_1 + \varphi_5 + 90^\circ) + 0 \right. \\ &\quad \left. + V_7 \cos(7\omega_1 + \varphi_7 - 90^\circ) + \dots \right]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}v_{ca}(t) &= v_c(t) - v_a(t) \\ &= \sqrt{3} \left[V_1 \cos(\omega_1 + \varphi_1 + 150^\circ) + V_2 \cos(2\omega_1 + \varphi_2 - 150^\circ) + 0 \right. \\ &\quad \left. + V_4 \cos(4\omega_1 + \varphi_4 + 150^\circ) + V_5 \cos(5\omega_1 + \varphi_5 - 150^\circ) + 0 \right. \\ &\quad \left. + V_7 \cos(7\omega_1 + \varphi_7 + 150^\circ) + \dots \right]\end{aligned}$$

Harmônicos em Sistemas Trifásicos Equilibrados

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Observações

- ✓ A fundamental e as harmônicas de ordem 4, 7, ..., $3k+1$ ($k=1, 2, 3, \dots$) tem sequência positiva;
- ✓ As harmônicas de ordem 2, 5, ..., $3k-1$ ($k=1, 2, 3, \dots$) tem sequência negativa;
- ✓ As harmônicas múltiplas de três ou triplas ($3k$, $k=1, 2, 3, \dots$) tem sequência zero.

Harmônicos em Sistemas Trifásicos Equilibrados

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Observações

- ✓ Se harmônicos estão presentes, então componentes harmônicas de sequência positiva, negativa e zero podem existir, mesmo que o sistema seja equilibrado.
- ✓ Correntes harmônicas de seq. positiva produzem campo girante direto; Seq. negativa produzem rotação oposta; e as correntes harmônicas de seq. zero produzem um campo que oscila, mas não gira entre os enrolamentos de fase.

Valor Eficaz Verdadeiro

O Valor eficaz, ou rms, de uma onda periódica é definido como:

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} f^2(t) dt}$$

Substituindo $f(t)$ da série trigonométrica de Fourier:

Série expandida:

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{a_0^2}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} a_h^2 + \sum_{h=1}^{\infty} b_h^2 \right)}$$

Série compacta:

$$F_{rms} = \sqrt{c_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{\infty} c_h^2}$$

Valor Eficaz Verdadeiro

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

O Valor rms, de uma onda de tensão e corrente, periódicas, não senoidais, é definido como:

$$V_{rms} = \sqrt{V_{cc}^2 + \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}$$
$$= \sqrt{V_{cc}^2 + \sum_{h=1}^{\infty} V_{rms,h}^2}$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_{cc}^2 + \frac{1}{2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$
$$= \sqrt{I_{cc}^2 + \sum_{h=1}^{\infty} I_{rms,h}^2}$$

Valor Eficaz Verdadeiro

Assim, duas componentes são definidas (IEEE Std. 1459, 2010):

- A fundamental: v_1 e i_1 ; e
- A residual (v_H , i_H).

$$v = v_1 + \sum_{h \neq 1} v_h = v_1 + v_H$$

$$i = i_1 + \sum_{h \neq 1} i_h = i_1 + i_H$$

Valor Eficaz Verdadeiro

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Pode-se observar que:

- ✓ As componentes harmônicas contribuem para o aumento do valor eficaz de tensão e corrente;
- ✓ O aumento do valor eficaz implica aumento de perdas;
- ✓ O método mais comum para o cálculo do valor rms é obter uma amostra digitalizada da forma de onda e calcular a FFT, produzindo percentuais para a frequência fundamental e para os múltiplos da fundamental.

Valor Eficaz Verdadeiro

O valor rms pode ser calculado por meio de diferentes técnicas:

Valor Médio: utiliza relação entre valor médio em meio ciclo com o valor rms.

$$v(t) = V_p \text{sen}(\omega_1 t)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{médio}} &= \frac{V_p}{T/2} \int_0^{T/2} \text{sen}(\omega_1 t) dt = -\frac{V_p}{\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \Big|_0^{T/2} \\ &= -\frac{V_p}{\pi} \cos(\pi - 1) = 2 \frac{V_p}{\pi} = 0,6366 \cdot \sqrt{2} V_{\text{rms}} \end{aligned}$$

$$\frac{V_{\text{rms}}}{V_{\text{médio}}} = 1,11$$

Valor de Pico: x1,414. Sinais senoidais sem distorção harmônicas.

Valor Eficaz Verdadeiro

O valor rms pode ser calculado por meio de diferentes técnicas:

Valor Eficaz Verdadeiro (True RMS): aplicam-se a sinais senoidais e não senoidais. Largura de banda de passagem do instrumento deve ser no mínimo igual a 1,5 kHz (25^a harmônica).

Tabela 4.2 – Sinais com diferentes graus de conformidade senoidal e instrumentos de medição de diferentes técnicas de medição de valor eficaz.

	Tipo de Medidor		
	rms verdadeiro	Valor médio $1,11 \cdot V_{\text{médio}}$	Método de pico $0,707 \cdot V_p$
Onda senoidal	100%	100%	100%
Onda quadrada	100%	110%	82%
Onda triangular	100%	96%	121%
Corrente AVV	100%	86%	127%
Corrente PC	100%	60%	184%
Controlador de luz	100%	84%	113%

Fonte: IEEE Std. 1100 (2005).

Corrente no Neutro

A corrente no neutro nos circuitos de distribuição a 4 fios, mesmo havendo um equilíbrio razoável entre as cargas, é superior a corrente de desequilíbrio.

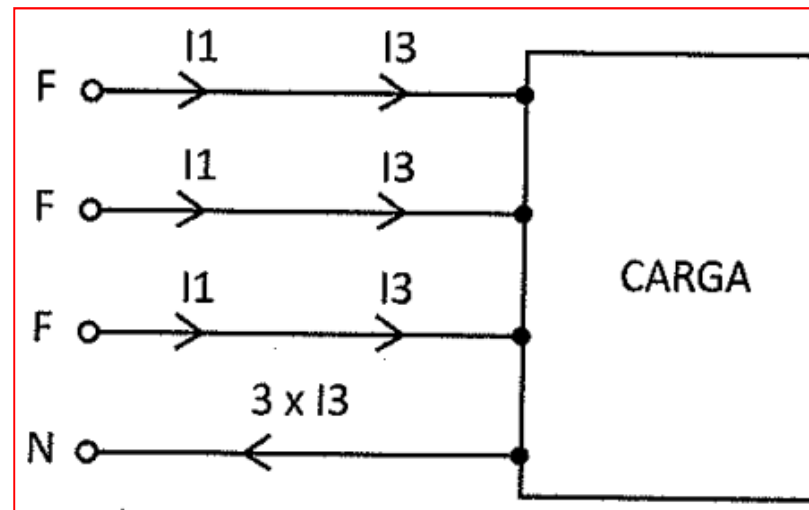
$$\begin{aligned} I_N &= I_a + I_b + I_c \\ &= I_{a1} \cos(\omega_1 t + \delta_1) + I_{b1} \cos(\omega_1 t + \delta_1 - 120^\circ) + I_{c1} \cos(\omega_1 t + \delta_1 + 120^\circ) \\ &\quad + I_{a2} \cos(2\omega_1 t + \delta_2) + I_{b2} \cos(2\omega_1 t + \delta_2 + 120^\circ) + I_{c2} \cos(2\omega_1 t + \delta_2 - 120^\circ) \\ &\quad + I_{a3} \cos(3\omega_1 t + \delta_3) + I_{b3} \cos(3\omega_1 t + \delta_3) + I_{c3} \cos(3\omega_1 t + \delta_3) + \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_N &= 3 \left[I_{a3} \cos(3\omega_1 + \delta_3) + I_{a6} \cos(6\omega_1 + \delta_6) + I_{a9} \cos(9\omega_1 + \delta_9) + \dots \right] \\ &= 3 \sum_{h \in \{3,6,9,\dots\}} I_h \cos(h\omega_1 t + \delta_n) \end{aligned}$$

Corrente no Neutro

A corrente no neutro nos circuitos de distribuição a 4 fios, mesmo havendo um equilíbrio razoável entre as cargas, é superior a corrente de desequilíbrio.

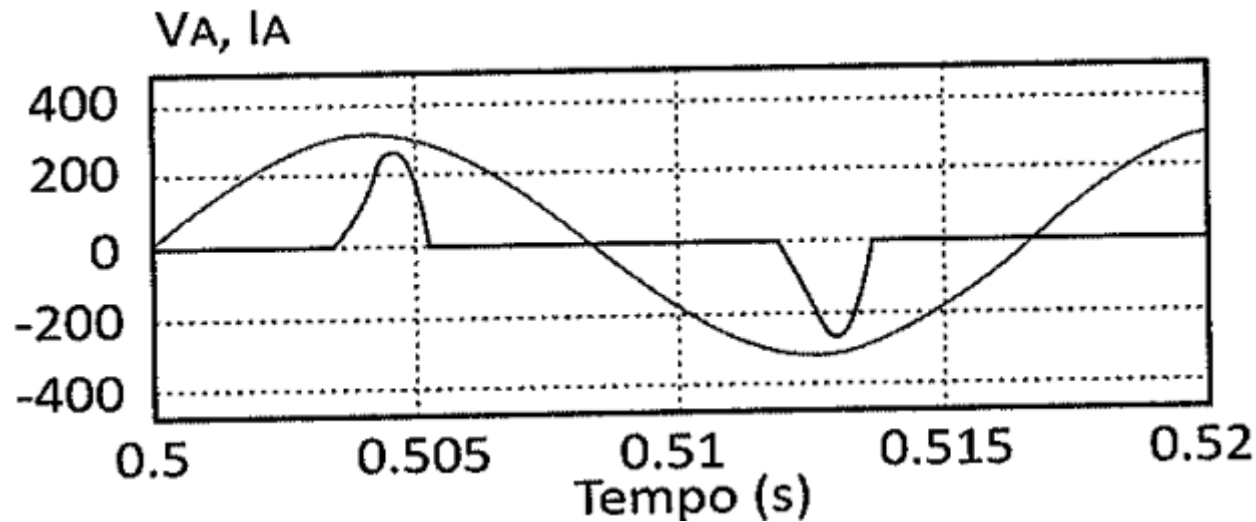
$$I_N = 3 \left[I_{a3} \cos(3\omega_1 + \delta_3) + I_{a6} \cos(6\omega_1 + \delta_6) + I_{a9} \cos(9\omega_1 + \delta_9) + \dots \right]$$
$$= 3 \sum_{h \in \{3,6,9,\dots\}} I_h \cos(h\omega_1 t + \delta_n)$$



Corrente no Neutro

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

A maior parte das cargas eletrônicas monofásicas conduz corrente somente no pico de tensão. A principal componente é a 3ª. O risco de sobrecarga no neutro é bem real, já que o neutro pode ter sido projetado para ter a mesma bitola ou até menor que a do condutor fase.



Corrente no Neutro

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Medição de corrente em um QD que alimenta cargas equilibradas e não lineares.

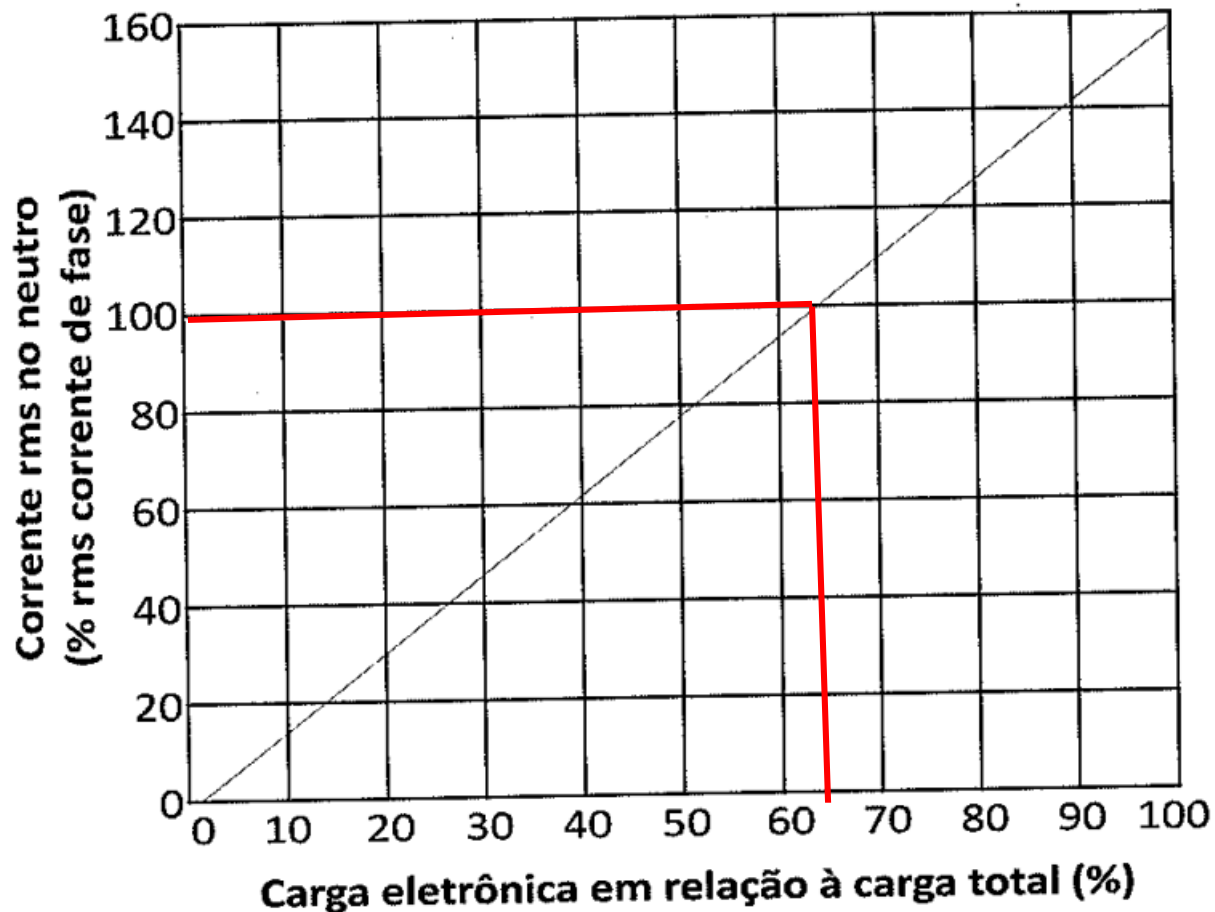
<i>Ordem h</i>	<i>Corrente Fase A, B, C (rms)</i>	<i>Corrente no Neutro (rms)</i> $I_A + I_B + I_C$
1	1,201	0,000
3	0,977	2,931
5	0,620	0,000
7	0,264	0,000
9	0,068	0,204
11	0,114	0,000
13	0,089	0,000
15	0,029	0,087
17	0,042	0,000
19	0,044	0,000
21	0,019	0,057
23	0,020	0,000
Total	1,698 A (100%)	2,940 A (173%)

IEEE Std. 1100, recomenda capacidade nominal de 200% no neutro.

Corrente no Neutro

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

A corrente no neutro é equivalente à corrente de fase quando o percentual de cargas eletrônicas é cerca de 65% da carga em um circuito trifásico.



Condutor Neutro segundo NBR 5410

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ O neutro não pode ser comum a mais de um circuito;
- ✓ O neutro de um circuito monofásico deve ter a mesma seção do condutor fase;
- ✓ Quando num circuito trifásico com neutro ou bifásico e neutro a taxa de 3ª harmônica e seus múltiplos for superior a 15%, a seção do condutor neutro, não deve ser inferior à dos condutores de fase, podendo ser igual à dos condutores fase se essa taxa não for superior a 33%.

Condutor Neutro segundo NBR 5410

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Num circuito trifásico com neutro cujos condutores de cada fase tenham seção superior a 25mm^2 , a seção do neutro pode ser inferior à dos condutores fase, quando 3 condições forem simultaneamente atendidas:
 - ✓ circuito equilibrado,
 - ✓ taxa das triplas menor que 15% e
 - ✓ neutro protegido contra sobrecorrentes.

Tabela 4.4 – Seção do condutor neutro em função da bitola do condutor-fase.

Seção dos condutores de fase mm^2	$S \leq 25$	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400
Seção reduzida do condutor neutro mm^2	S	25	25	35	50	70	70	95	120	150	185

Fonte: NBR 5410 (2004).

Condutor Neutro segundo NBR 5410

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ A seção do condutor neutro, quando o conteúdo das triplas for superior a 33%, deve ser baseada no valor de corrente no neutro calculada como:

$$I_N = f_k \sqrt{\sum_{h=1}^N I_b^2}$$

Em que f_k é o fator de correção.

Tabela 4.5 – Fator de correção para corrente no neutro.

Taxa de 3 ^ª harmônica	Fator de Correção f_k	
	Circuito trifásico com neutro	Circuito com duas fases e neutro
33% a 35%	1,15	1,15
36% a 40%	1,19	1,19
41% a 45%	1,24	1,23
46% a 50%	1,35	1,27
51% a 55%	1,45	1,30
56% a 60%	1,55	1,34
61% a 65%	1,64	1,38
≥ 66%	1,73	1,41

Fonte: ABNT NBR 5410 (2004).

Condutor Neutro segundo NBR 5410

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Ordem h	Corrente Fase A, B, C (rms)	Corrente no Neutro (rms) $I_A + I_B + I_C$
1	1,201	0,000
3	0,977	2,931
5	0,620	0,000
7	0,264	0,000
9	0,068	0,204
11	0,114	0,000
13	0,089	0,000
15	0,029	0,087
17	0,042	0,000
19	0,044	0,000
21	0,019	0,057
23	0,020	0,000
Total	1,698 A (100%)	2,940 A (173%)

Condutor Neutro segundo NBR 5410

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

✓ A corrente no condutor FASE é calculada:

$$I_{\phi} = f_k \cdot I \cdot (p/100) \cdot 3$$

p é a participação da 3ª harmônica.

Exemplo: corrente de fase é **1,698 A** e **$I_N = 2,94A$** .

$$p = 1,698/2,940 = 0,58 = 58\%$$

Assim:

$$I_{\phi} = f_k \cdot I \cdot (p/100) \cdot 3 = 1,55 \times 1,698 \times \frac{58}{100} \times 3 = 4,58 \text{ A}$$

$$I_N = f_k \sqrt{\sum I_h^2} = 1,55 \times 2,94 = 4,557 \text{ A}$$

Conclusões:

- ✓ As harmônicas de sequência zero fluem somente em sistemas trifásicos tetrafilares e, porque estão em fase nas 3 fases, se somam no condutor neutro.
- ✓ as harmônicas de sequência zero não estão presentes na corrente de linha de uma carga não linear **equilibrada** conectada em Δ e Y sem terra.
- ✓ nas correntes de linha de uma carga não linear equilibrada (em Δ e Y sem terra) estão presentes apenas componentes de sequência positiva e negativa.

Harmônicos em Sistemas Desequilibrados

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

- ✓ Equipamentos que produzem distorções harmônicas quando alimentados por um **sistema desequilibrado** podem resultar em aumento de injeções harmônicas, em especial harmônicas de sequência zero.
- ✓ Seja um sistema trifásico a 4 fios, desequilibrado com cargas não lineares monofásicas, com as seguintes correntes: **Tabela 4.6** – Fasores de componentes harmônicos de corrente.

Corrente de Fase	Componentes de Fase		
	Fundamental	3ª Harmônica	5ª Harmônica
A	$I_{a1} = 1 \angle 0^\circ$	$I_{a3} = 0,5 \angle 0^\circ$	$I_{a5} = 0,3 \angle 0^\circ$
B	$I_{b1} = 2 \angle -120^\circ$	$I_{b3} = 1,0 \angle 0^\circ$	$I_{b5} = 0,6 \angle +120^\circ$
C	$I_{c1} = 1 \angle +120^\circ$	$I_{c3} = 0,5 \angle 0^\circ$	$I_{c5} = 0,3 \angle -120^\circ$

Harmônicos em Sistemas Desequilibrados

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Seja um sistema trifásico a 4 fios, desequilibrado com cargas não lineares monofásicas, com as seguintes correntes:

Tabela 4.6 – Fasores de componentes harmônicos de corrente.

Corrente de Fase	Componentes de Fase		
	Fundamental	3ª Harmônica	5ª Harmônica
A	$I_{a1} = 1 \angle 0^\circ$	$I_{a3} = 0,5 \angle 0^\circ$	$I_{a5} = 0,3 \angle 0^\circ$
B	$I_{b1} = 2 \angle -120^\circ$	$I_{b3} = 1,0 \angle 0^\circ$	$I_{b5} = 0,6 \angle +120^\circ$
C	$I_{c1} = 1 \angle +120^\circ$	$I_{c3} = 0,5 \angle 0^\circ$	$I_{c5} = 0,3 \angle -120^\circ$

O valor eficaz das correntes é:

$$I_{A,rms} = I_{C,rms} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [1 + (0,5)^2 + (0,3)^2]} = 0,81 \text{ A}$$

$$I_{B,rms} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [2^2 + 1 + (0,6)^2]} = 1,7 \text{ A}$$

Harmônicos em Sistemas Desequilibrados

Tabela 4.6 – Fasores de componentes harmônicos de corrente.

Corrente de Fase	Componentes de Fase		
	Fundamental	3ª Harmônica	5ª Harmônica
A	$I_{a1} = 1 \angle 0^\circ$	$I_{a3} = 0,5 \angle 0^\circ$	$I_{a5} = 0,3 \angle 0^\circ$
B	$I_{b1} = 2 \angle -120^\circ$	$I_{b3} = 1,0 \angle 0^\circ$	$I_{b5} = 0,6 \angle +120^\circ$
C	$I_{c1} = 1 \angle +120^\circ$	$I_{c3} = 0,5 \angle 0^\circ$	$I_{c5} = 0,3 \angle -120^\circ$

Aplicando o teorema de Fortescue (**componentes simétricas**):

Componentes Harmônicas Fundamentais	Componentes de Sequência		
	Positiva	Negativa	Zero
	$I_{a1} = 1,33 \angle 0^\circ$ $I_{b1} = 1,33 \angle -120^\circ$ $I_{c1} = 1,33 \angle +120^\circ$	$I_{a2} = 0,33 \angle +120^\circ$ $I_{b2} = 0,33 \angle -120^\circ$ $I_{c2} = 0,33 \angle 0^\circ$	$I_{a0} = 0,33 \angle -120^\circ$ $I_{b0} = 0,33 \angle -120^\circ$ $I_{c0} = 0,33 \angle -120^\circ$
3ª Harmônica	$I_{a1} = 0,17 \angle +120^\circ$ $I_{b1} = 0,17 \angle 0^\circ$ $I_{c1} = 0,17 \angle -120^\circ$	$I_{a2} = 0,17 \angle -120^\circ$ $I_{b2} = 0,17 \angle 0^\circ$ $I_{c2} = 0,17 \angle +120^\circ$	$I_{a0} = 0,67 \angle 0^\circ$ $I_{b0} = 0,67 \angle 0^\circ$ $I_{c0} = 0,67 \angle 0^\circ$
5ª Harmônica	$I_{a1} = 0,10 \angle -120^\circ$ $I_{b1} = 0,10 \angle +120^\circ$ $I_{c1} = 0,10 \angle 0^\circ$	$I_{a2} = 0,40 \angle 0^\circ$ $I_{b2} = 0,40 \angle +120^\circ$ $I_{c2} = 0,40 \angle -120^\circ$	$I_{a0} = 0,10 \angle +120^\circ$ $I_{b0} = 0,10 \angle +120^\circ$ $I_{c0} = 0,10 \angle +120^\circ$

Harmônicos em Sistemas Desequilibrados

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Aplicando o teorema de Fortescue (**componentes simétricas**):

Componentes Harmônicas Fundamental	Componentes de Sequência		
	Positiva	Negativa	Zero
	$I_{a1} = 1,33 \angle 0^\circ$ $I_{b1} = 1,33 \angle -120^\circ$ $I_{c1} = 1,33 \angle +120^\circ$	$I_{a2} = 0,33 \angle +120^\circ$ $I_{b2} = 0,33 \angle -120^\circ$ $I_{c2} = 0,33 \angle 0^\circ$	$I_{a0} = 0,33 \angle -120^\circ$ $I_{b0} = 0,33 \angle -120^\circ$ $I_{c0} = 0,33 \angle -120^\circ$
3ª Harmônica	$I_{a1} = 0,17 \angle +120^\circ$ $I_{b1} = 0,17 \angle 0^\circ$ $I_{c1} = 0,17 \angle -120^\circ$	$I_{a2} = 0,17 \angle -120^\circ$ $I_{b2} = 0,17 \angle 0^\circ$ $I_{c2} = 0,17 \angle +120^\circ$	$I_{a0} = 0,67 \angle 0^\circ$ $I_{b0} = 0,67 \angle 0^\circ$ $I_{c0} = 0,67 \angle 0^\circ$
5ª Harmônica	$I_{a1} = 0,10 \angle -120^\circ$ $I_{b1} = 0,10 \angle +120^\circ$ $I_{c1} = 0,10 \angle 0^\circ$	$I_{a2} = 0,40 \angle 0^\circ$ $I_{b2} = 0,40 \angle +120^\circ$ $I_{c2} = 0,40 \angle -120^\circ$	$I_{a0} = 0,10 \angle +120^\circ$ $I_{b0} = 0,10 \angle +120^\circ$ $I_{c0} = 0,10 \angle +120^\circ$

No neutro:

$$I_N = 3 [0,33 \text{sen}(\omega_1 t - 120^\circ) + 0,67 \text{sen}(3\omega_1 t) + 0,10 \text{sen}(5\omega_1 t + 120^\circ)]$$

RMS:

$$I_N = 3 \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(0,33)^2 + (0,67)^2 + (0,10)^2]} = 1,6 \text{ A}$$

Harmônicos em Sistemas Desequilibrados

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

No neutro - RMS:

$$I_N = 3 \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(0,33)^2 + (0,67)^2 + (0,10)^2]} = 1,6 A$$

- Se a carga fosse equilibrada e linear $\rightarrow I_N = 0$;
- Se a carga fosse desequilibrada e linear $\rightarrow I_N = 3 \cdot \frac{0,33}{\sqrt{2}} = 0,7 A$
- Se a carga fosse equilibrada e não linear $\rightarrow I_N = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} (0,5)^2} = 1,06 A$

Harmônicos em Sistemas Desequilibrados

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

No neutro - RMS:

$$I_N = 3 \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(0,33)^2 + (0,67)^2 + (0,10)^2]} = 1,6 \text{ A}$$

- Se a carga fosse equilibrada e linear $\rightarrow I_N = 0$;
- Se a carga fosse desequilibrada e linear $- I_N = 3 \cdot \frac{0,33}{\sqrt{2}} = 0,7 \text{ A}$
- Se a carga fosse equilibrada e não linear $I_N = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{2} (0,5)^2} = 1,06 \text{ A}$
- Corrente de neutro é maior que a das fases A e C (0,81A), sendo 97% maior no caso da carga desequilibrada e não linear (1,6A).

Harmônicos em Sistemas Desequilibrados

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Conclusões:

- ✓ Em sistemas desequilibrados, as componentes de sequência zero das harmônicas triplas são aditivas às correntes de seq. zero das demais componentes no neutro;
- ✓ Em caso da conexão Δ desequilibrado, é verificada a presença de componentes triplas de sequência positiva e negativa nas correntes de linha.

Harmônicos em Sistemas Desequilibrados

ELT 428 – QUALIDADE DE ENERGIA

Em sistemas desequilibrados com carga não linear:

- ✓ Componentes de seq. zero de harmônicas não triplas de corrente podem circular no neutro;
- ✓ As harmônicas de seq. zero são aprisionadas, mantidas circulando nos enrolamentos conectados em Δ de trafos de distribuição causando aquecimento adicional;