Aula 10 – Indicadores de Distorção Harmônica
Parte 2

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

Medidas de Distorção Harmônica

As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações na forma de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (Prodist – Módulo 8).

Ondas de tensão e corrente podem ser expressas como:

$$v(t) = V_0 + V_1 sen\,(\omega_1 t + \varphi_1) + V_2 sen\,(2\omega_1 t + \varphi_2) + \cdots$$

$$i(t) = I_0 + I_1 sen\,(\omega_1 t + \delta_1) + I_2 sen\,(2\omega_1 t + \delta_2) + \cdots$$

Distorção Harmônica Total (DHT)

O desvio total de uma onda distorcida em relação à sua **componente fundamental** pode ser estimado com a ajuda do DHT (ou THD, do inglês *Total Harmonic Distortion)*, um dos índices mais usados para indicar o conteúdo harmônico do sinal.

Distorção Harmônica Total (DHT)

É a medida do grau de distorção de uma onda em relação a uma senoide pura.

DHT para tensão:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h\neq 1} V_h^2}}{V_1}$$

$$\boxed{V_{rms} = \sqrt{V_{rms,1}^2\left(1 + DHT_V^2\right)}}$$

DHT para corrente:

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h\neq 1} I_h^2}}{I_1}$$

Exemplo: Para o espectro de corrente rms de um PC de 200W, calcule o DHT e o valor rms verdadeiro.

h	1	3	5	7	9	11
I_h	1,201	0,977	0,620	0,264	0,068	0,114
$I_h\%$	100	81,3	51,6	22,0	5,7	9,5
h	13	15	17	19	21	23
I_h	0,089	0,029	0,042	0,044	0,019	0,020
$I_h\%$	7,4	2,4	3,5	3,7	1,6	1,7

Solução:

$$\boxed{DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h\neq 1} I_h^2}}{I_1}}$$

$$DHT_I = \frac{1}{1,201}\Big[(0,977)^2 + (0,620)^2 + (0,264)^2 + (0,068)^2 + (0,114)^2$$

$$+ (0,089)^2 + (0,029)^2 + (0,042)^2 + (0,044)^2 + (0,019)^2 + (0,02)^2\Big]^{1/2}$$

$$= 0,9994 = 99,94\%$$

Exemplo: Para o espectro de corrente rms de um PC de 200W, calcule o DHT e o valor rms verdadeiro.

h	1	3	5	7	9	11
I_h	1,201	0,977	0,620	0,264	0,068	0,114
I_h%	100	81,3	51,6	22,0	5,7	9,5
h	13	15	17	19	21	23
I_h	0,089	0,029	0,042	0,044	0,019	0,020
I_h%	7,4	2,4	3,5	3,7	1,6	1,7

Solução: $I_{rms} = I_{rms,1} \cdot \sqrt{1+(DHT_I)^2} = 1{,}201\sqrt{1+(0{,}9944)^2} = 1{,}698\ A$

$$\boxed{\begin{aligned} V_{rms} &= \sqrt{V_{cc}^2 + \frac{1}{2}\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \\ &= \sqrt{V_{cc}^2 + \sum_{h=1}^{\infty} V_{rms,h}^2} \end{aligned}}$$

Distorção Harmônica Total (DHT)

DHT para tensão:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h \neq 1} V_h^2}}{V_1}$$

Uma variante da DHT considera a relação do valor residual pelo valor eficaz verdadeiro (**DHTE – DHT Efetiva**).

$$DHTE_V = \frac{V_{rms,H}}{V_{rms}} \qquad DHTE_I = \frac{I_{rms,H}}{I_{rms}}$$

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

Exemplo: Uma corrente distorcida tem valor rms verdadeiro igual a 62,5A, além das seguintes componentes harmônicas: 59A (60Hz), 15,6A (300Hz), 10,3A (420Hz), 8,66A (>420Hz). Calcule:

-**Corrente rms residual:**

$$I_{rms,H} = \sqrt{I_{rms}^2 - I_{rms,1}^2} = \sqrt{(62,5)^2 - (59)^2} = 20,6\ A$$

- **DHT:**

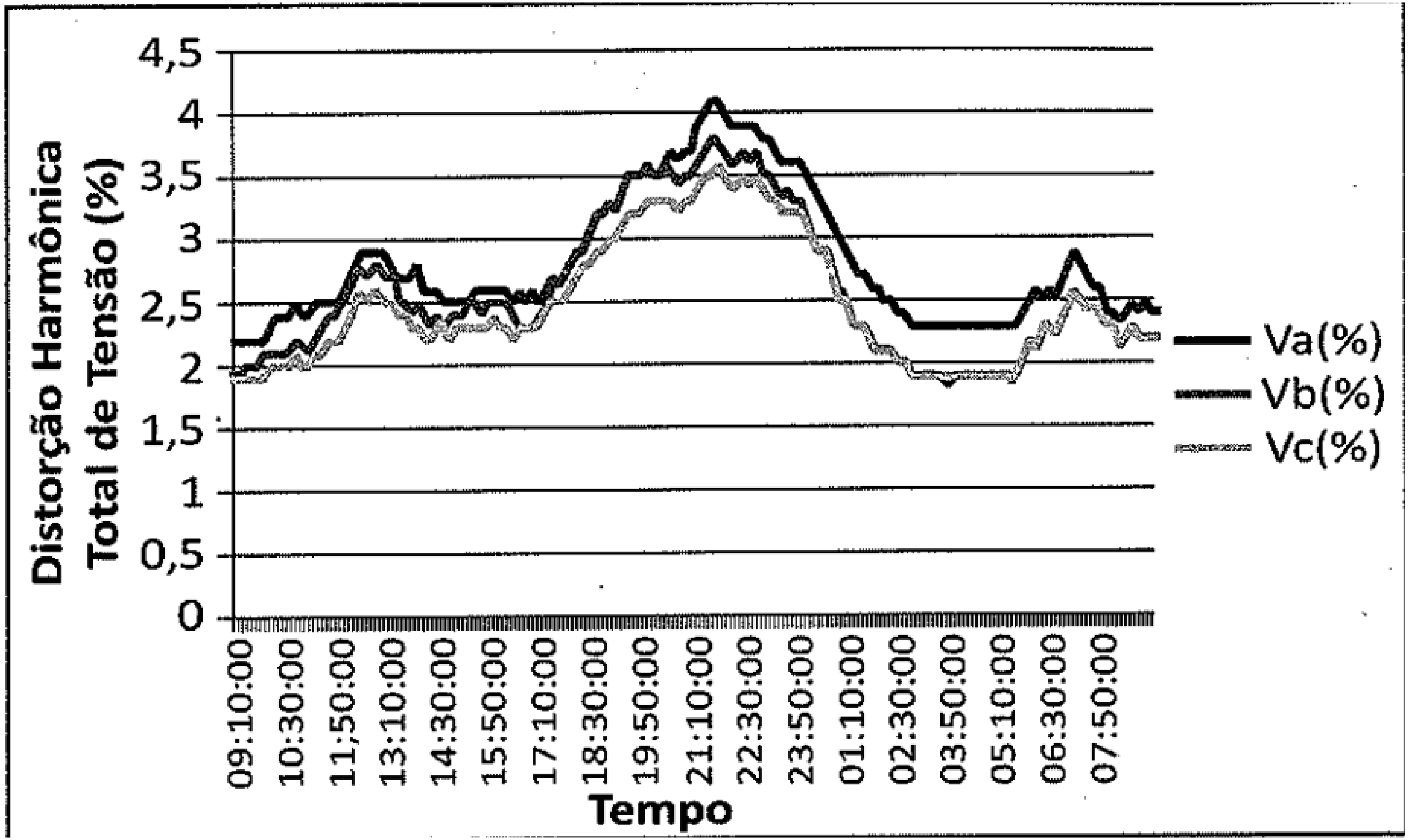
$$DHT_I = \frac{I_{rms,H}}{I_{rms,1}} = \frac{20,6}{59} = 0,349 \cong 34,9\%$$

- **DHTE:** $$DHTE_I = \frac{I_{H,rms}}{I_{rms}} = \frac{20,6}{62,5} \cong 33\%$$

A maioria dos Instrumentos calculam somente DHT.

Distorção Harmônica Total (DHT)

Em condição de desequilíbrio, há um DHT para cada fase.



Distorção Harmônica Total (DHT)

- ✓ O nível de DHT da corrente pode ser mal interpretado.
- ✓ Muitos Inversores de Frequência apresentam altas taxas de DHT_I para a corrente de entrada quando tais dispositivos estão operando com cargas leves.
- ✓ Tal fato não é necessariamente preocupante para a instalação, porque a magnitude da corrente fundamental é baixa, embora o DHT seja alto.
- ✓ Para analisar a distorção neste casos, usa-se a **Taxa de Distorção de Demanda (TDD)** (IEEE Std. 519, 1992).

Taxa de Distorção de Demanda (TDD)

A TDD (também do inglês *Total Demand Distortion*) é expressa como um percentual da média dos últimos 12 meses da demanda máxima mensal da corrente fundamental I_L.

Assim, permite avaliar o nível de distorção de corrente com base na capacidade máxima da instalação.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{N} I_h^2}}{I_L}$$

Geralmente menor que o DHT.

I_L desconhecido pode ser estimado:

- corrente de plena carga do trafo; ou

- ampacidade do condutor da instalação.

$$\boxed{TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{N} I_h^2}}{I_1} \cdot \frac{I_1}{I_L}}$$

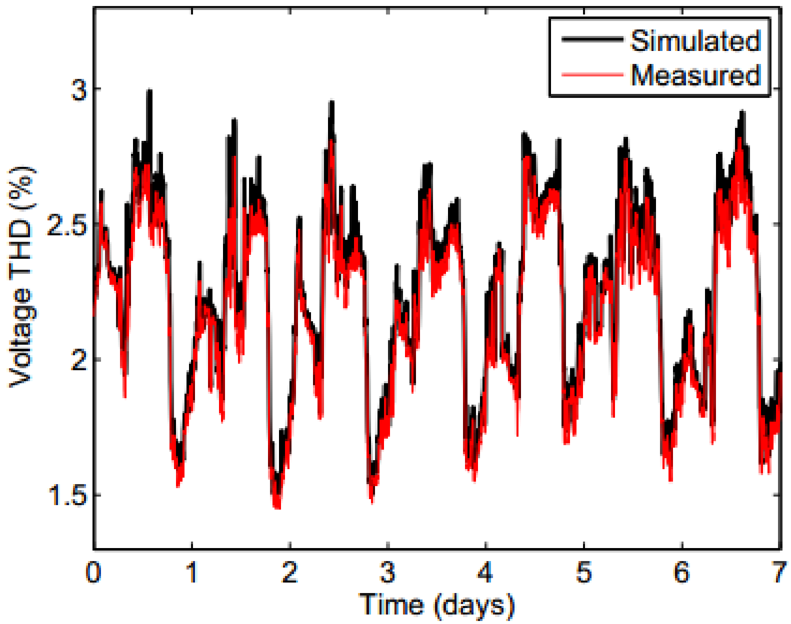
Exemplo: Uma carga consistindo inteiramente de lâmpadas fluorescentes compactas, tem DHTI de 150%. A corrente fundamental da carga é de 100A em um circuito de corrente nominal de 400A. Determine a TDD estimada.

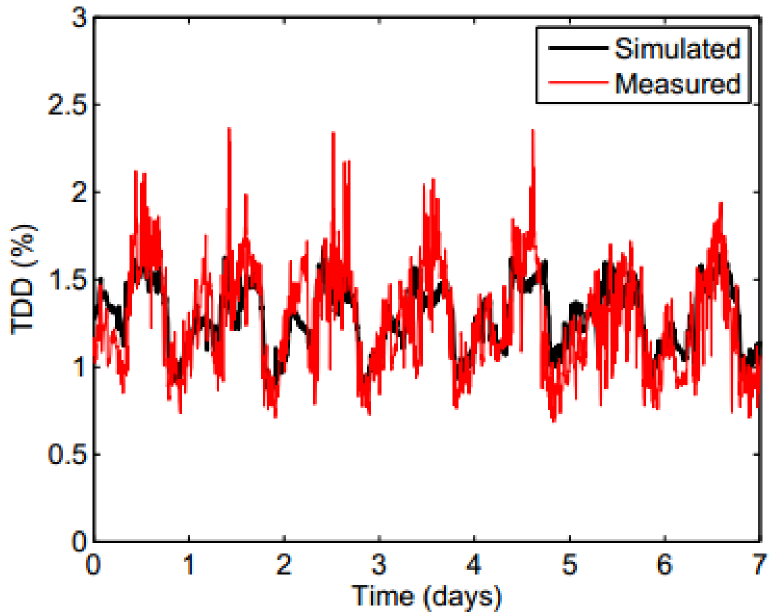
$$\boxed{TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{N} I_h^2}}{I_1} \cdot \frac{I_1}{I_L}}$$

$$TDD = 150 \times \frac{100}{400} = 37,5\%$$

Distorção Harmônica Total (DHT)

Medições na Usina do Mineirão – Belo Horizonte





Distorção Harmônica Individual (DHI)

$$\boxed{DHI = \frac{C_h}{C_1} \cdot 100\ \%}$$

em que C_h representa a componente harmônica de tensão ou corrente de ordem h em relação à fundamental C_1.

A violação da *DHI* orienta à medida corretiva, como a colocação de filtros harmônicos, e pode caracterizar a condição de ressonância.

Potência em sistemas com harmônicos

O conceito clássico de potência tem levantado discussões, devido a necessidade de quantificar corretamente situações que envolvam circuitos polifásicos com ondas distorcidas. No entanto, a grande maioria dos instrumentos de medição atuais mantém a forma clássica de medir potência.

Potência Instantânea:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t)$$

$$= \left[V_0 + \sum_{k \neq 0} V_k sen\left(k\omega_1 t + \varphi_k\right) \right] \cdot \left[I_0 + \sum_{m \neq 0} I_m sen\left(m\omega_1 t + \delta_m\right) \right]$$

Potência em sistemas com harmônicos

Potência Instantânea: $p(t) = v(t) \cdot i(t)$

Potência Ativa: média da potência instantânea.

$$P = \frac{1}{kT} \int_{t}^{t+kT} v(t) \cdot i(t)\, dt = \frac{1}{kT} \int_{t}^{t+kT} p\, dt$$

Pode ser dividida em potência ativa fundamental e harmônica:

$$\boxed{P = P_1 + P_H}$$

$$\boxed{P_1 = \frac{1}{kT} \int_{t}^{t+kT} v_1 i_1\, dt = V_{rms,1} I_{rms,1} \cos\theta_1}$$

$$\boxed{\begin{aligned} P_H &= V_0 I_0 + \sum_{\substack{k \neq 0 \\ k \neq 1}} V_{rms,k} I_{rms,k} \cos\theta_k \\ &= P_{cc} + \sum_{\substack{k \neq 0 \\ k \neq 1}} P_k = P - P_1 \end{aligned}}$$

Não é útil

Potência em sistemas com harmônicos

Exemplo: Calcular a potência média resultante.

$$v(t) = 1{,}2 \cos(\omega t) + 0{,}33 \cos(3\omega t) + 0{,}2 \cos(5\omega t)$$

$$i(t) = 0{,}6 \cos(\omega t + 30^\circ) + 0{,}33 \cos(3\omega t + 45^\circ) + 0{,}2 \cos(7\omega t + 60^\circ)$$

Solução:

$$P = P_1 + P_3 = \frac{1{,}2 \times 0{,}6}{2} \cos 30^\circ + \frac{(0{,}33)^2}{2} \cos 45^\circ = 0{,}32W$$

$$\boxed{P_1 = \frac{1}{kT} \int_t^{t+kT} v_1 i_1 dt = V_{rms,1} I_{rms,1} \cos\theta_1}$$

$$\boxed{\begin{aligned} P_H &= V_0 I_0 + \sum_{\substack{k \neq 0 \\ k \neq 1}} V_{rms,k} I_{rms,k} \cos\theta_k \\ &= P_{cc} + \sum_{\substack{k \neq 0 \\ k \neq 1}} P_k = P - P_1 \end{aligned}}$$

Potência em sistemas com harmônicos

Potência reativa:

$$Q = \sum_{k} V_{rms,k} I_{rms,k} sen\theta_k = Q_1 + Q_H$$

$$Q_1 = V_{rms,1} I_{rms,1} sen\theta_1$$

(Budeanu,1927) propôs um modelo para a potência com as parcelas ativa, reativa e de distorção D:

$$\boxed{P = P_1 + P_H} \qquad \boxed{Q = Q_1 + Q_H}$$

$$D = \left(\sum_{k \neq m} V_k sen(\omega_k t + \varphi_k) \right) \cdot \left(\sum_{m \neq k} I_m sen(\omega_m t + \varphi_m \mp \theta_m) \right)$$

Potência em sistemas com harmônicos

Potência aparente: grandemente influenciada pela distorção, da tensão e/ou corrente.

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms}$$
$$= \left(\sqrt{V_0^2 + \sum_{k=1}^{n} V_{rms,k}^2} \right) \cdot \left(\sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^{n} I_{rms,k}^2} \right)$$

Se a distorção na tensão é desprezível:

$$S = V_{rms,1} \cdot \left(\sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^{n} I_{rms,k}^2} \right) = V_{rms,1} \cdot \left(\sqrt{I_0^2 + I_{rms,1}^2 + I_{rms,2}^2 + \cdots} \right)$$

Potência em sistemas com harmônicos

Potência aparente:

Lembrando que:

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

$$\boxed{F_{rms} = \sqrt{c_0^2 + c_{rms,1}^2 + c_{rms,2}^2 + c_{rms,3}^2 + \cdots + c_{rms,h}^2 + \cdots}}$$

$$V_{rms}^2 = V_{rms,1}^2 + \left(V_{cc}^2 + \sum_{h \neq 1} V_{rms,h}^2 \right) = V_{rms,1}^2 + V_H^2$$

$$I_{rms}^2 = I_{rms,1}^2 + \left(I_{cc}^2 + \sum_{h \neq 1} I_{rms,h}^2 \right) = I_{rms,1}^2 + I_H^2$$

$$\begin{aligned} S^2 &= \left(V_{rms} \cdot I_{rms}\right)^2 = \left(V_{rms,1}^2 + V_{rms,H}^2\right) \cdot \left(I_{rms,1}^2 + I_{rms,H}^2\right)^2 \\ &= \left(V_{rms,1}^2 \cdot I_{rms,1}^2\right) + \left(V_{rms,1}^2 \cdot I_{rms,H}^2\right) + \left(V_{rms,H}^2 \cdot I_{rms,1}^2\right) + \left(V_{rms,H}^2 \cdot I_{rms,H}^2\right) \\ &= S_1^2 + D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 \\ &= S_1^2 + S_N^2 \end{aligned}$$

Potência em sistemas com harmônicos

Potência aparente:

$$
\begin{aligned}
S^2 &= \left(V_{rms} \cdot I_{rms}\right)^2 = \left(V_{rms,1}^2 + V_{rms,H}^2\right) \cdot \left(I_{rms,1}^2 + I_{rms,H}^2\right)^2 \\
&= \left(V_{rms,1}^2 \cdot I_{rms,1}^2\right) + \left(V_{rms,1}^2 \cdot I_{rms,H}^2\right) + \left(V_{rms,H}^2 \cdot I_{rms,1}^2\right) + \left(V_{rms,H}^2 \cdot I_{rms,H}^2\right) \\
&= S_1^2 + D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 \\
&= S_1^2 + S_N^2
\end{aligned}
$$

S é separada em componente fundamental (S_1) e não fundamental (S_N). Já a S_N é subdividida em 3 componentes:

- potência de distorção da corrente D_I;
- potência de distorção da tensão D_V;
- potência aparente harmônica S_H;

Potência aparente:

$$S^2 = \left(V_{rms,1}^2 \cdot I_{rms,1}^2\right) + \left(V_{rms,1}^2 \cdot I_{rms,H}^2\right) + \left(V_{rms,H}^2 \cdot I_{rms,1}^2\right) + \left(V_{rms,H}^2 \cdot I_{rms,H}^2\right)$$

$$= S_1^2 + D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 = S_1^2 + S_N^2$$

Potência Aparente **Fundamental:** $\boxed{S_1 = V_{rms,1} \cdot I_{rms,1}}$ ou

$$\boxed{S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}$$

Potência **de Distorção da corrente**:

$$D_I = V_{rms,1} \cdot I_{rms,H} = S_1 \cdot DHT_I$$

Potência **de Distorção da tensão**:

$$D_V = I_{rms,1} \cdot V_{rms,H} = S_1 \cdot DHT_V$$

Potência aparente **harmônica**:

$$S_H = V_{rms,H} \cdot I_{rms,H} = S_1 \cdot DHT_V \cdot DHT_I$$

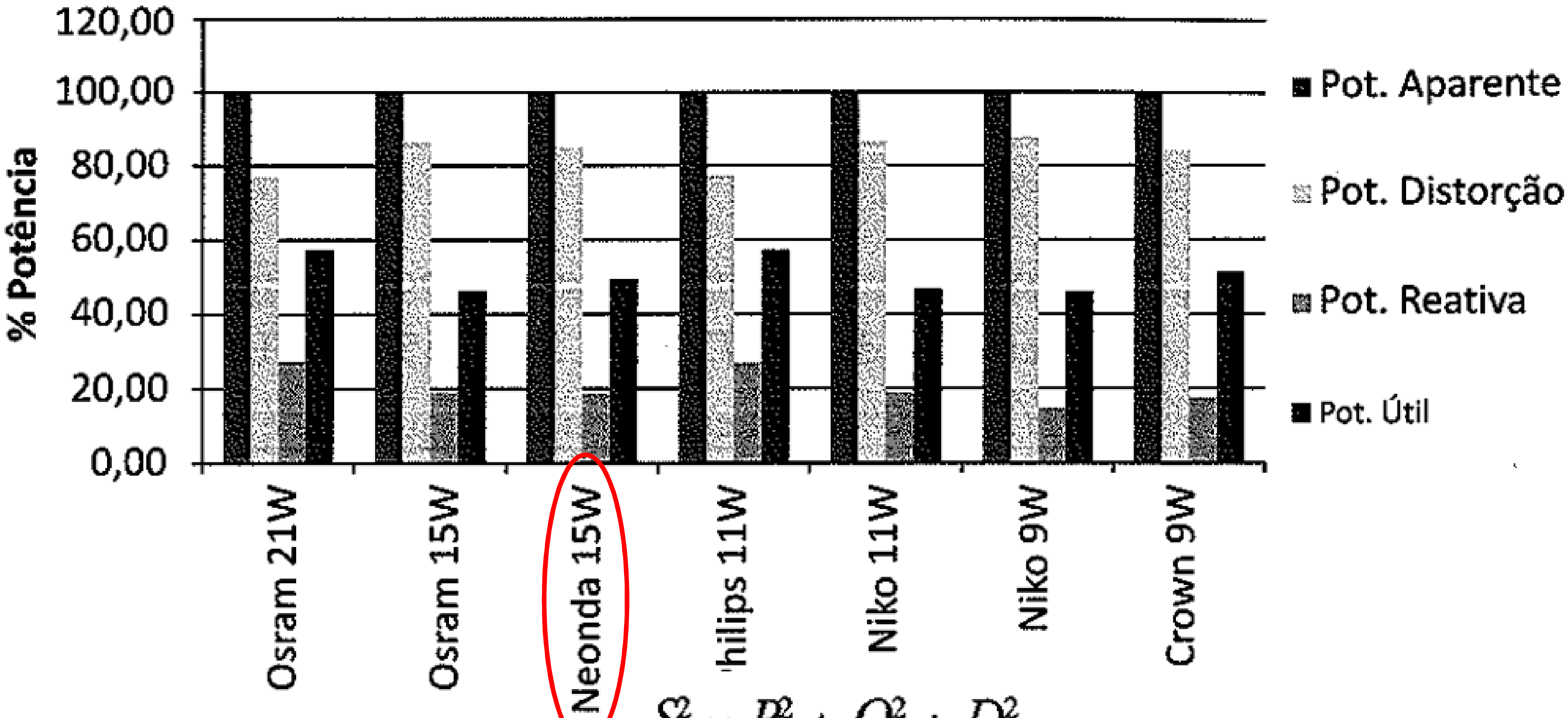
Potência em sistemas com harmônicos

Potência não ativa: agrupa componentes de potência não ativa fundamental e não fundamental. $N = \sqrt{S^2 - P^2}$

Não deve ser confundida com potência reativa, exceto quando as formas de onda de tensão e corrente são perfeitamente senoidais, $N = Q_1 = Q$.

Ainda não existe um consenso no conceito de potência para sistemas polifásicos desequilibrados e não senoidais.

Medição de potência em diferentes lâmpadas (não lineares):



$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2.$$

$P = 15{,}6$ W	(46,29%)
$Q = 6{,}47$var	(19,20%)

$D = 29{,}2$ dVA	(86,65%)
$S = 33{,}7$ VA	(100%)

Potência em sistemas com harmônicos

Fator de Potência: indica o quão eficiente uma carga retira potência útil da fonte de alimentação.

$$FP = \frac{P}{S}$$

FP de deslocamento ou fundamental: $FP_1 = \frac{P_1}{S_1} = \cos\theta_1$

FP total ou verdadeiro:

$$\boxed{FP = \frac{P_0 + \overline{P}_1 + \overline{P}_2 + \overline{P}_3 + \cdots}{V_{1,rms} I_{1,rms} \left(\sqrt{1 + DHT_V^2}\right) \cdot \left(\sqrt{1 + DHT_I^2}\right)}}$$

$$\boxed{FP = \frac{V_0 I_0 + \sum_{k \neq 0} V_{rms,k} I_{rms,k} \cos\theta_k}{\left(\sqrt{V_0^2 + \sum_{k \neq 0} V_{rms,k}^2}\right) \cdot \left(\sqrt{I_0^2 + \sum_{k \neq 0} I_{rms,k}^2}\right)}}$$

Potência em sistemas com harmônicos

FP total ou verdadeiro:

$$FP = \frac{P_0 + \overline{P}_1 + \overline{P}_2 + \overline{P}_3 + \cdots}{V_{1,rms} I_{1,rms} \left(\sqrt{1 + DHT_V^2}\right) \cdot \left(\sqrt{1 + DHT_I^2}\right)}$$

Ou (IEEE Std. 1459, 2010):

$$FP = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} = \frac{\left(P_1 / S_1\right)\left[1 + P_H / P_1\right]}{\sqrt{1 + \left(S_N / S_1\right)^2}}$$

$$= \frac{\left[1 + \left(P_H / P_1\right)\right] \cdot FP_1}{\sqrt{1 + DHT_I^2 + DHT_V^2 + \left(DHT_I + DHT_V\right)^2}}$$

FP de deslocamento pode ser alto e o verdadeiro baixo, devido a alta não linearidade das cargas.

Potência em sistemas com harmônicos

Fator de Distorção ou potência de distorção:

$$FD = \frac{I_{rms,1}}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{1 + DHT_I^2}}$$

A vantagem em conhecer separadamente FP verdadeiro e fundamental está em sinalizar ao consumidor a causa da taxação excedente (por causa da fundamental ou em decorrência da presença de harmônicos).

Fator de Potência

Tipo de Circuito	Fator de Potência	
Circuito Linear CC	1	Unitário $FP = FP_1$
Circuito Linear CA	$FP_1 = \frac{P_1}{S_1}$	Deslocamento $FP = FP_1$
Circuito Não Linear CA	IEEE 1459, 2010 $FP = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}}$	Verdadeiro $FP \leq FP_1$

Potência em sistemas com harmônicos

Exemplo: Dada a tabela.

Tabela 4.10 – Componentes de frequência de tensão e corrente em pu.

Frequência (Hz)	Tensão	Corrente
60	$1 \angle 0°$	$1 \angle -30°$
180	$0{,}2 \angle 20°$	$0{,}2 \angle 80°$
420	$0{,}05 \angle 10°$	$0{,}15 \angle -20°$

a) Expressar v(t) e i(t)

$$v(t) = \cos((2\pi 60)t) + 0{,}2\cos((2\pi 180)t + 20°) + 0{,}05\cos((2\pi 420)t + 10°)$$
$$= \cos(377t) + 0{,}2\cos(1131t + 20°) + 0{,}05\cos(2639t + 10°)$$

$$i(t) = \cos(377t - 30° + 0{,}2\cos(1131t + 80°) + 0{,}15\cos(2639t - 20°)$$

Potência em sistemas com harmônicos

Exemplo: Dada a tabela.

Tabela 4.10 – Componentes de frequência de tensão e corrente em pu.

Frequência (Hz)	Tensão	Corrente
60	$1\angle 0°$	$1\angle -30°$
180	$0,2\angle 20°$	$0,2\angle 80°$
420	$0,05\angle 10°$	$0,15\angle -20°$

b) Calcular o valor eficaz de v(t) e i(t)

$$V_{rms} = \sqrt{1+0,2^2+0,05^2} = 1,021\ pu$$

$$I_{rms} = \sqrt{1+0,2^2+0,15^2} = 1,031\ pu$$

Potência em sistemas com harmônicos

Exemplo: Dada a tabela.

Tabela 4.10 – Componentes de frequência de tensão e corrente em pu.

Frequência (Hz)	Tensão	Corrente
60	$1 \angle 0°$	$1 \angle -30°$
180	$0{,}2 \angle 20°$	$0{,}2 \angle 80°$
420	$0{,}05 \angle 10°$	$0{,}15 \angle -20°$

c) Calcular a potência ativa fundamental e harmônica

$$P_1 = V_1 I_1 \cos\theta_1 = 1 \cdot \cos 30° = 0{,}866\ pu$$

$$P_H = V_3 I_3 \cos\theta_3 + V_7 I_7 \cos\theta_7 = 0{,}020 + 0{,}006 = 0{,}026\ pu$$

$$P = P_1 + P_H = 0{,}866 + (0{,}020 + 0{,}006) = 0{,}892\ pu$$

Exemplo: Dada a tabela.

Tabela 4.10 – Componentes de frequência de tensão e corrente em pu.

Frequência (Hz)	Tensão	Corrente
60	$1 \angle 0°$	$1 \angle -30°$
180	$0,2 \angle 20°$	$0,2 \angle 80°$
420	$0,05 \angle 10°$	$0,15 \angle -20°$

d) Calcular a potência de distorção da corrente e tensão

$$D_I = V_{1,rms} \cdot I_{H,rms} = 1 \cdot \sqrt{(0,2)^2 + (0,15)^2} = 0,25\ pu$$

$$D_V = I_{1,rms} \cdot V_{H,rms} = 1 \cdot \sqrt{(0,2)^2 + (0,05)^2} = 0,206\ pu$$

Potência em sistemas com harmônicos

Exemplo: Dada a tabela.

Tabela 4.10 – Componentes de frequência de tensão e corrente em pu.

Frequência (Hz)	Tensão	Corrente
60	$1 \angle 0°$	$1 \angle -30°$
180	$0{,}2 \angle 20°$	$0{,}2 \angle 80°$
420	$0{,}05 \angle 10°$	$0{,}15 \angle -20°$

e) Calcular a potência aparente: harmônica e a não fundamental.

Deve-se inicialmente calcular a DHT da tensão e corrente:

$$DHT_V = \frac{\sqrt{V_3^2 + V_7^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{0{,}2^2 + 0{,}05^2}}{1} \cong 20{,}62\%$$

$$DHT_I = \frac{\sqrt{I_3^2 + I_7^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{0{,}2^2 + 0{,}15^2}}{1} \cong 25\%$$

Exemplo: Dada a tabela.

Tabela 4.10 – Componentes de frequência de tensão e corrente em pu.

Frequência (Hz)	Tensão	Corrente
60	$1 \angle 0°$	$1 \angle -30°$
180	$0{,}2 \angle 20°$	$0{,}2 \angle 80°$
420	$0{,}05 \angle 10°$	$0{,}15 \angle -20°$

e) Calcular a potência aparente: harmônica e a não fundamental.

$$S_H = S_1 \cdot DHT_V \cdot DHT_I$$
$$= 1 \cdot (0{,}206) \cdot (0{,}25) = 0{,}052 \; pu$$

$$S_N = \sqrt{D_I^2 + D_V^2 + S_H^2}$$
$$= \sqrt{(0{,}25)^2 + (0{,}206)^2 + (0{,}052)^2} = 0{,}328 \; pu$$

Potência em sistemas com harmônicos

Exemplo: Dada a tabela.

Tabela 4.10 – Componentes de frequência de tensão e corrente em pu.

Frequência (Hz)	Tensão	Corrente
60	$1 \angle 0°$	$1 \angle -30°$
180	$0{,}2 \angle 20°$	$0{,}2 \angle 80°$
420	$0{,}05 \angle 10°$	$0{,}15 \angle -20°$

f) Calcular o fator de potência de deslocamento, de distorção e verdadeiro.

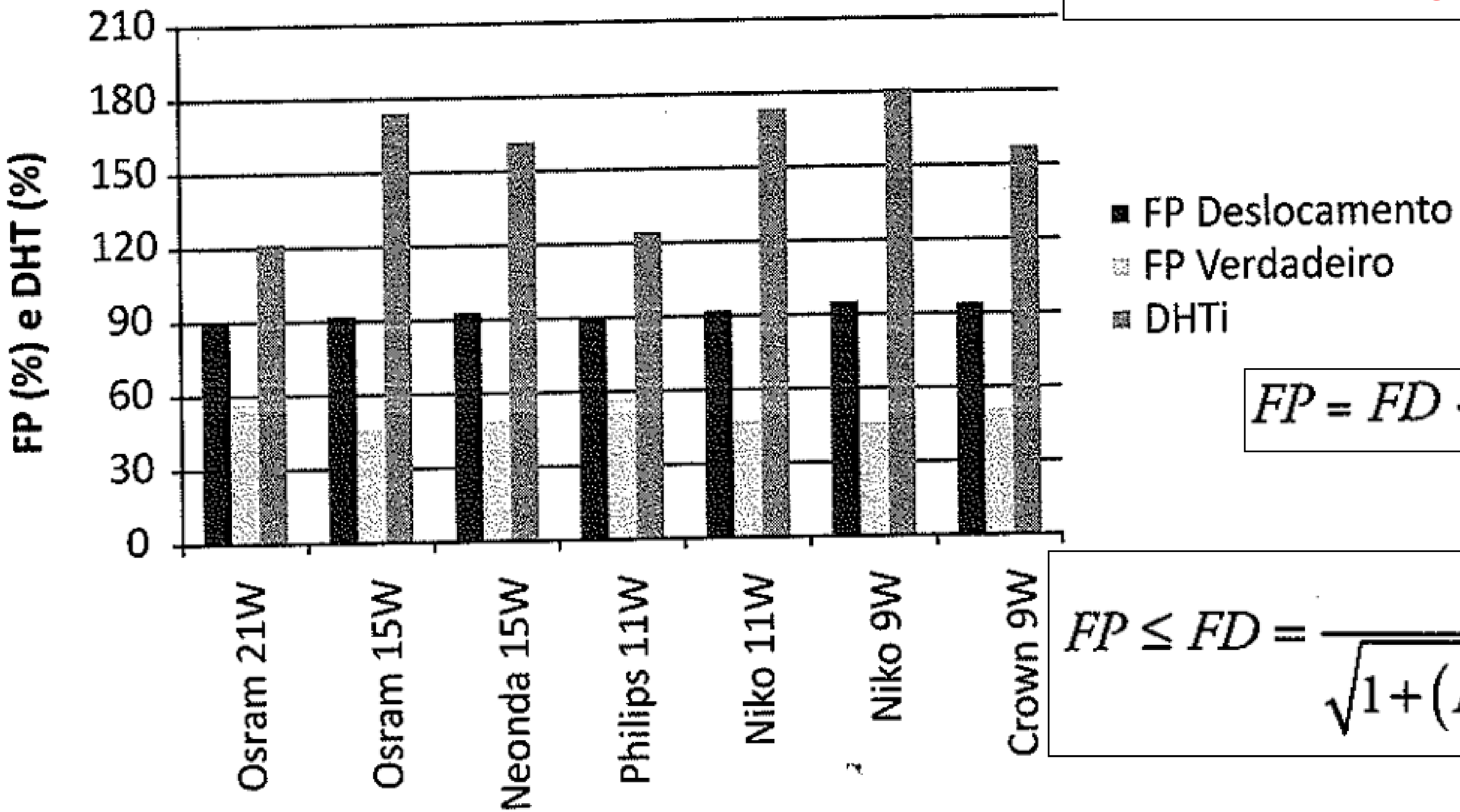
$$FP_1 = \cos(30°) = 0{,}866 \ \textit{atrasado}$$

$$FP = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} = \frac{0{,}892}{\sqrt{1+(0{,}328)^2}} = 0{,}848$$

Potência em sistemas com harmônicos

Figura 4.19 – Fator de potência de deslocamento, verdadeiro e DHT_I de lâmpadas compactas.

>DHTI → < FP verdadeiro

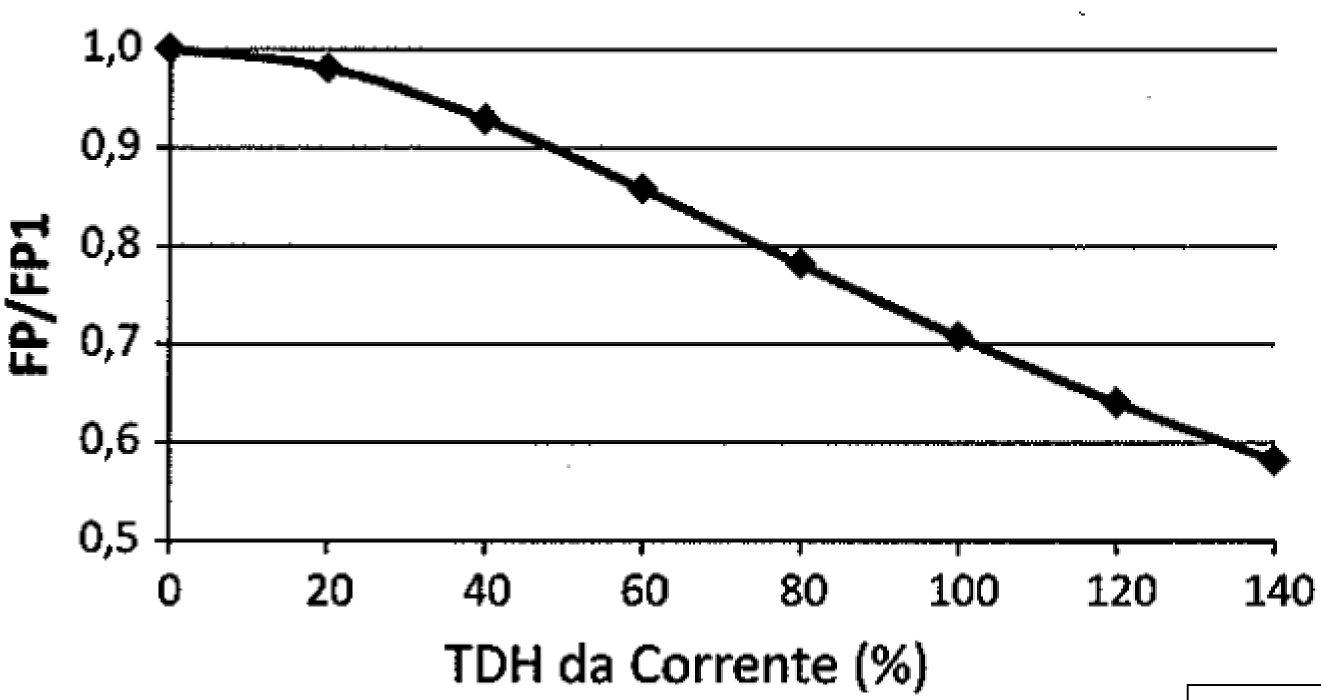


$$FP = FD \cdot FP_1$$

$$FP \le FD = \frac{1}{\sqrt{1+\left(DHT_I\right)^2}}$$

Potência em sistemas com harmônicos

Figura 4.20 – Máximo fator de potência verdadeiro.



$$FP = FD \cdot FP_1$$

$$FP \le FD = \frac{1}{\sqrt{1+\left(DHT_I\right)^2}}$$

Fator K de transformadores

- ✓ As características nominais dos trafos baseiam-se no aquecimento provocado por correntes senoidais de 60Hz.

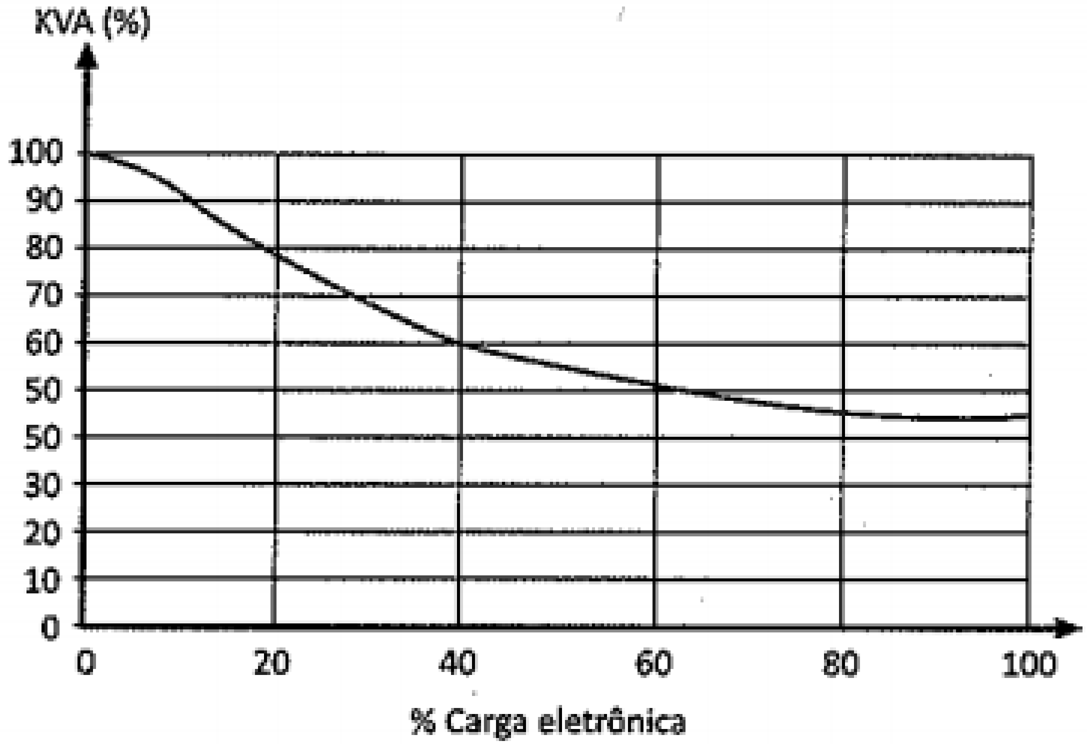
- ✓ Mas, se circular correntes harmônicas, o trafo sofrerá aquecimento adicional que poderá reduzir sua vida útil.

- ✓ Assim, qualquer trafo que transporta corrente harmônica deve ser bem avaliado para verificar se opera em condições nominais ou em sobrecarga.

Fator K de transformadores

Redução de potência para que sejam mantidas as condições nominais de dissipação de calor e vida útil:

Figura 4.26 – Desclassificação de potência em transformador com carga não linear.



Fator K de transformadores

- ✓ Fabricantes de trafos definiram o fator k para indicar sua adequação para correntes não senoidais de cargas não lineares.
- ✓ O Fator K é um coeficiente que descreve o calor adicional que ocorre em um transformador que alimenta cargas não lineares.
- ✓ Um transformador destinado a cargas lineares tem fator K igual a um (K = 1). Com K > 1, o trafo é construído para suportar maiores distorções na corrente.
- ✓ Comercialmente existem trafos com K = 4, 9, 12, 20, 30, 40 e 50.

Fator K de transformadores

Se as correntes harmônicas são conhecidas, o fator k pode ser calculado para comparar com o fator K de placa.

$$K = \sum_{h=1}^{N} h^2 \cdot \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 = \sum_{h=1}^{N} h^2 \cdot I_{h,pu}^2$$

Se o K calculado for menor ou igual ao de placa, este estará operando em conformidade com a norma (IEEE Std. 1100, 2005).

Fator K de transformadores

Exemplo: $$K = \sum_{h=1}^{N} h^2 \cdot \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 = \sum_{h=1}^{N} h^2 \cdot I_{h,pu}^2$$

Valor *rms* verdadeiro = 73,72 A					
h	I_{rms} (A)	I_h/I_1	$(I_h/I_1)^2$	h^2	$h^2\,(I_h/I_1)^2$
1	52,45	1,000	1,0000	1	1,000
3	42,27	0,806	0,6496	9	5,846
5	24,97	0,476	0,2266	25	5,665
7	9,44	0,180	0,0324	49	1,588
9	3,72	0,071	0,0050	81	0,405
11	5,51	0,091	0,0083	121	1,004
13	4,77	0,077	0,0059	169	0,997
			Σ = 1,9278		Fator K = 16,505

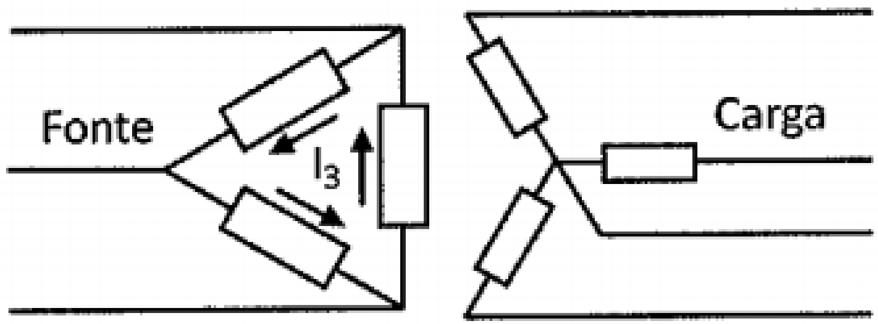
Comercialmente existem trafos com K = 4, 9, 12, 20, 30, 40 e 50. Assim, opta-se por um trafo de fator K de 20.

Fator K de transformadores

Os transformadores de fator K não unitário, são especialmente projetados para lidar com os efeitos de aumento de aquecimento e de correntes no neutro produzidos por carga eletrônica não linear.

Características de projeto de trafos:

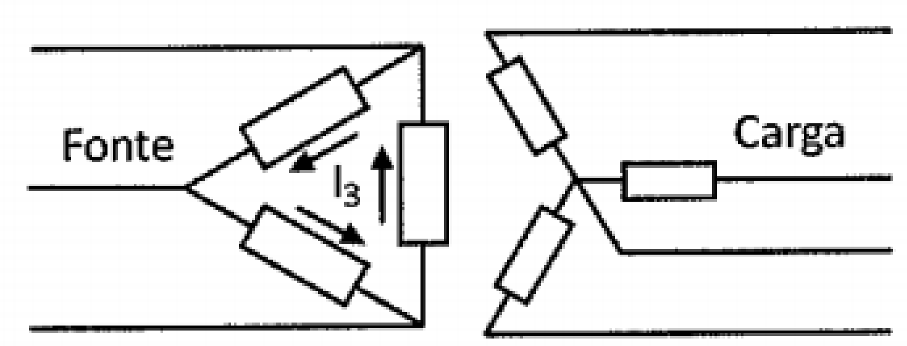
• Em geral, os enrolamentos do primário são ligados em Δ e o secundário em



Fator K de transformadores

•**Características de projeto de trafos:**

•Em geral, os enrolamentos do primário são ligados em Δ e o secundário em Y.



• Emprego de blindagem eletromagnética entre os enrolamentos primário e secundário em cada bonina, atenuando harmônicos de maior frequência;

• Aumento de bitola do enrolamento Δ devido às correntes harmônicas triplas (e de sequência zero)

Fator K de transformadores

•**Características de projeto de trafos:**

•Dimensionamento da bitola do condutor neutro do secundário para 200% do valor nominal da corrente de plena carga do secundário;

• Núcleo especialmente concebidos para manter a densidade de fluxo B (Wb/m^2) abaixo da saturação devido a formas de onda de tensão distorcida usando, para tanto, ferro de grãos maiores.