

## Caso de estudio: Onda Triangular de Voltaje

Autor: Ing. Carlos Andrés Cordero Fernández

### Resumen

Se presenta un caso real de calidad de energía en baja tensión donde la tensión de una fase adopta una forma cercana a una onda triangular, en presencia de corrientes altamente distorsionadas. A partir de la forma de onda y del espectro armónico se calculan THD, factores de cresta y un K-factor simplificado, destacando el peso de los armónicos triplén y la posible operación del transformador en zona de saturación, en coherencia con estudios previos [1–4].

### Sinopsis

En un tablero de distribución de baja tensión se registraron las formas de onda de tensión y corriente de la fase B que alimenta cargas electrónicas y variadores de frecuencia. El analizador de calidad de energía entregó:

- **Forma\_onda.txt**: muestras de  $v_B(t)$  e  $i_B(t)$ .
- **Armónicos.txt**: valores RMS de DC, fundamental y armónicos H02–H255 de tensión y corriente.

La tensión presenta flancos casi lineales y crestas agudas (Fig. 1), mientras que la corriente es fuertemente no sinusoidal. La nota se centra en tres aspectos:

- Importancia de los armónicos de baja orden, en especial los triplén, sobre la forma de onda y el transformador.
- Cuantificación compacta de THD, factores de cresta y K-factor.
- Implicaciones para la operación del transformador y opciones de mitigación viables.

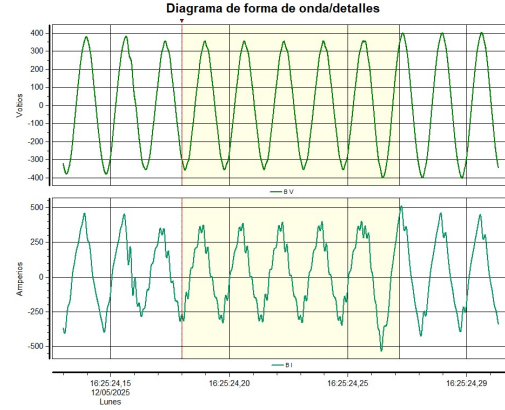


Figura 1: Tensión (arriba) y corriente (abajo) medidas en la fase B.

### Marco teórico

#### 0.1 Distorsión armónica básica

En presencia de armónicos, tensión y corriente se escriben como suma de componentes a frecuencias  $nf_1$  [3, 4]. Usando valores RMS  $V_n$  e  $I_n$ :

$$v(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N V_n \sin(n\omega t + \varphi_n), \quad (1a)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \sum_{n=1}^N I_n \sin(n\omega t + \theta_n), \quad (1b)$$

con  $\omega = 2\pi f_1$ .

Los indicadores más usados son:

$$\text{THD}_v = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} [\%], \quad (2)$$

$$\text{THD}_i = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} [\%], \quad (3)$$

y el factor de cresta

$$\text{CF}_v = \frac{V_{\text{pico}}}{V_{\text{rms}}}, \quad \text{CF}_i = \frac{I_{\text{pico}}}{I_{\text{rms}}}. \quad (4)$$

Una onda sinusoidal pura tiene  $\text{CF} \approx 1,41$  y una triangular ideal  $\text{CF} \approx 1,73$ .

#### 0.2 Onda triangular y armónicos impares

Una tensión triangular ideal puede representarse por una serie de Fourier sólo con armónicos impares, de amplitud  $\propto$

$1/n^2$  [4] Notamos que una onda triangular ideal puede escribirse como

$$v_{\Delta}(t) = \frac{8V_{\text{pico}}}{\pi^2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k+1)^2} \sin[(2k+1)\omega t]. \quad (5)$$

Un conjunto limitado de armónicos impares de baja frecuencia (3, 5, 7, 9, ...) es suficiente para que la forma de la tensión se acerque visualmente a una onda triangular.

### 0.3 Triplén y transformador

Los armónicos triplén (3, 6, 9, ...) se suman en el neutro y circulan por el transformador, aumentando pérdidas y flujo magnético [1, 2]. Cerca de la saturación, la curva tensión-corriente magnetizante se vuelve no lineal y la tensión secundaria puede mostrar formas muy distorsionadas [1, 3].

Para cuantificar el impacto térmico se utilizan indicadores tipo K-factor que ponderan cada armónico de corriente según su orden [3]. En esta nota se emplea una versión simplificada.

## Procedimiento de cálculo

### 0.4 Preparación de datos

`Forma_onda.txt` aporta  $N \approx 5632$  muestras de tiempo  $t_i$ , tensión  $v_i$  y corriente  $i_i$ . Los datos se convierten de coma a punto decimal y se procesan directamente.

`Armónicos.txt` contiene las etiquetas DC, FND y H02-H255 con sus valores RMS de tensión (`BVArmoValor`) y corriente (`BIArmoValor`). Cada fila  $H_{nn}$  corresponde al armónico de orden  $n$ .

### 0.5 RMS y factores de cresta

Los RMS se calculan a partir de las muestras:

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2}, \quad (6)$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N i_i^2}. \quad (7)$$

Se obtiene  $V_{\text{rms}} \approx 257,2 \text{ V}$  e  $I_{\text{rms}} \approx 247,4 \text{ A}$ .

Los valores pico son

$$V_{\text{pico}} = \max_i |v_i| \approx 403,6 \text{ V}, \quad (8)$$

$$I_{\text{pico}} = \max_i |i_i| \approx 537,4 \text{ A}, \quad (9)$$

y los factores de cresta

$$\text{CF}_v \approx 1,57, \quad (10)$$

$$\text{CF}_i \approx 2,17. \quad (11)$$

La tensión se sitúa entre seno y triangular, mientras que la corriente muestra picos muy marcados.

### 0.6 THD desde el espectro

De la fila FND:

$$V_1 = 244,76 \text{ V}, \quad I_1 = 221,44 \text{ A}.$$

La suma de cuadrados de armónicos ( $n \geq 2$ ) es

$$\sum_{n=2}^N V_n^2 \approx 42,71 \text{ V}^2, \quad (12)$$

$$\sum_{n=2}^N I_n^2 \approx 1247,57 \text{ A}^2. \quad (13)$$

Luego

$$\text{THD}_v \approx 2,67\%, \quad (14)$$

$$\text{THD}_i \approx 15,95\%. \quad (15)$$

Reconstruyendo los RMS totales desde el espectro (incluyendo DC) se obtienen valores cercanos a los calculados directamente, lo que valida el procesamiento.

### 0.7 Peso de los triplén

Filtrando sólo los armónicos múltiplo de 3:

$$\sum_{n \text{ triplén}} V_n^2 \approx 25,75 \text{ V}^2, \quad (16)$$

$$\sum_{n \text{ triplén}} I_n^2 \approx 845,28 \text{ A}^2. \quad (17)$$

La parte de THD asociada a ellos es

$$\text{THD}_{v_{\text{triplén}}} \approx 2,07\%, \quad (18)$$

$$\text{THD}_{i_{\text{triplén}}} \approx 13,13\%. \quad (19)$$

Es decir,  $\approx 78\%$  de la  $\text{THD}_v$  y  $\approx 82\%$  de la  $\text{THD}_i$  provienen de triplén, en línea con [4].

## 0.8 K-factor simplificado

Se define

$$K = \sum_{n=1}^N \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2 n^2, \quad (20)$$

obteniéndose  $K \approx 1,94$ , valor típico de una carga moderadamente distorsionada, compatible con los modelos de pérdidas adicionales en transformadores [2, 3].

## 1. Resultados y discusión

En forma resumida:

- Tensión:  $V_{\text{rms}} \approx 257 \text{ V}$ ,  $V_{\text{pico}} \approx 404 \text{ V}$ ,  $\text{CF}_v \approx 1,57$ ,  $\text{THD}_v \approx 2,67 \%$ .
- Corriente:  $I_{\text{rms}} \approx 247 \text{ A}$ ,  $I_{\text{pico}} \approx 537 \text{ A}$ ,  $\text{CF}_i \approx 2,17$ ,  $\text{THD}_i \approx 15,95 \%$ .
- Triplén: aportan  $\approx 78 \%$  de  $\text{THD}_v$  y  $\approx 82 \%$  de  $\text{THD}_i$ .
- K-factor:  $K \approx 1,94$ .

Los datos indican un alimentador con corrientes muy distorsionadas y clara dominancia de triplén. Esto concuerda con cargas rectificadas/variadores y con un transformador sometido a flujo de baja frecuencia rico en tercer armónico, lo que incrementa pérdidas y riesgo térmico [1–3].

## Conclusiones

1. La tensión presenta un perfil casi triangular, cuantificado por un factor de cresta intermedio entre la seno y la triangular ideal.
2. La distorsión de corriente es significativa y está dominada por armónicos triplén, que explican la mayor parte de la  $\text{THD}$  y de la corriente en el neutro.
3. El K-factor obtenido indica que el transformador trabaja con armónicos relevantes; la gestión de temperatura y corrientes de neutro es crítica para su vida útil.
4. Como mitigación se recomienda revisar la conexión del transformador (uso de devanados en delta), gestionar las cargas más distorsionantes y evaluar filtros armónicos cuando el perfil de carga lo justifique económicamente.

## Referencias

- [1] T. D. Kefalas and A. G. Kladas, “Grid voltage harmonics effect on distribution transformer operation,” in *Proc. 7th Mediterranean Conf. and Exhib. on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2010)*, 2010. doi: 10.1049/cp.2010.0894. [En línea]. Disponible en: <https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2010.0894>
- [2] D. M. Said and K. M. Nor, “Effects of harmonics on distribution transformers,” in *Proc. Australasian Universities Power Engineering Conf. (AUPEC)*, Sydney, Australia, Dec. 2008, pp. 1–5. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/224400789\\_Effects\\_of\\_harmonics\\_on\\_distribution\\_transformers](https://www.researchgate.net/publication/224400789_Effects_of_harmonics_on_distribution_transformers)
- [3] M. A. S. Masoum and E. F. Fuchs, “Transformer magnetizing current and iron-core losses in harmonic power flow,” *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 9, no. 1, pp. 10–20, Jan. 1994. doi: 10.1109/61.277676. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/61.277676>
- [4] G. Chicco, P. Postolache, and C. Toader, “Triplen harmonics: myths and reality,” *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 7, pp. 1541–1549, Jul. 2011. doi: 10.1016/j.epsr.2011.03.007. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779611000708>