



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



¿TD (Total Distortion) como un índice general de distorsión?

Prof. Andrés Cardozo

IIE – FING - UDELAR

EPIM 35 Febrero de 2025



¿Quiénes somos?

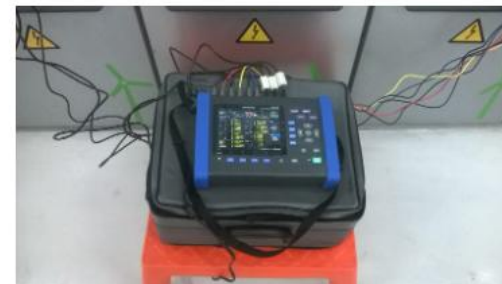


Calidad de Energía y Mediciones Especiales

<https://iie.fing.edu.uy/potencia/es/calidad-de-energia-y-mediciones-especiales/>

Introducción al grupo de trabajo:

El Grupo de Calidad de Energía Eléctrica y Mediciones Especiales (CEyME) tiene por cometido la investigación, la difusión de conocimientos y el aporte a la resolución de problemas en las áreas Compatibilidad Electromagnética en Baja Frecuencia en general, y Calidad de Energía Eléctrica en particular.



Dentro de sus áreas de interés se encuentran las siguientes:

- Asistencia técnica para solucionar problemas relacionados con perturbaciones (armónicas, interarmónicas, flicker, sags, swells, desbalances).
- Caracterización y detección de cargas perturbadoras en Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP).
- Diseño de soluciones para mitigación de las perturbaciones y sus efectos en los SEP.
- Mediciones de campo de perturbaciones, como tercera parte independiente.
- Compatibilidad Electromagnética entre equipos e instalaciones: Estudios de compatibilidad en Instalaciones Eléctricas de Baja, Media y Alta Tensión ante perturbaciones. Pruebas de emisión e inmunidad en equipos y sistemas.

Integrantes:

- MSc. Ing. Andrés Cardozo – acardozo@fing.edu.uy
- Ing. Virginia Echinope – echinope@fing.edu.uy

Colaboradores:

- Dr. Ing. Mario Vignolo – jesus@fing.edu.uy



¿Cómo cuantificar la distorsión?

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{F_n}{F_1}\right)^2}$$

h=40 o 50



$$TD = \sqrt{\frac{F_{rms}^2 - F_1^2}{F_1^2}}$$

THD, TDD, Pst, Plt, $\Delta V/V$

¿TD, X, Y?

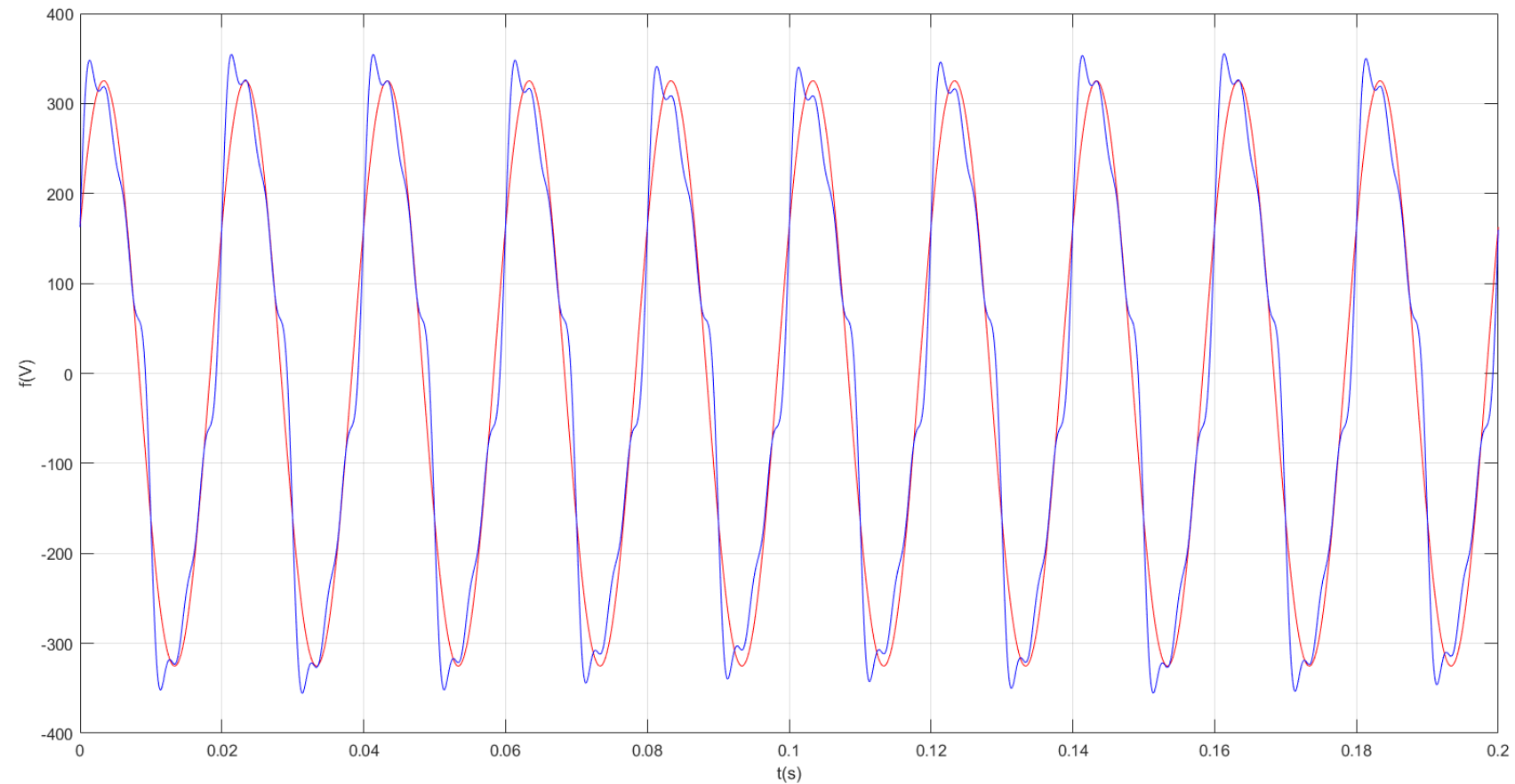


¿Qué es la distorsión?

$$f(t) = \sqrt{2} \cdot F_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \theta_1)$$



$$\tilde{f}(t) = f(t) + d(t)$$





¿Cuál es el problema con la distorsión?

Distorsión **Calidad**



Fabricantes de
equipos

Equipos más complejos
Equipos más caros...



Distorsión **Calidad**

Distribuidores
Transmisores



Redes más fuertes
Redes más caras...

¿ Los/las usuarios/as?



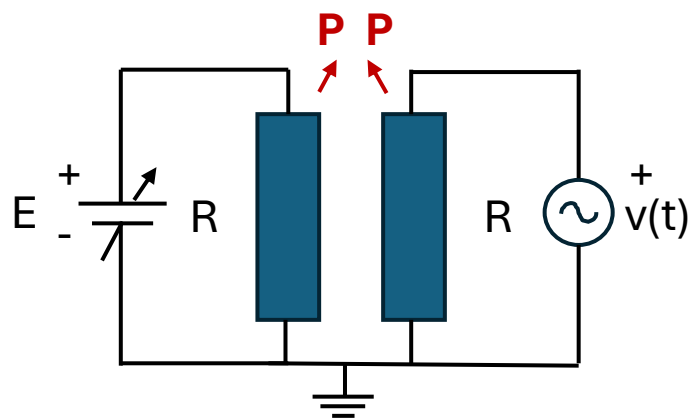
¿Qué tipo de distorsión importa en Calidad de Energía?

IEEE 1159:2019 “IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”

- Transitorios (impulsivos u oscilatorios): caracterizados por el **valor de pico**.
- Variaciones (instantáneas, momentáneas o temporarias) del valor eficaz (**rms**). Ejemplo: sags, swells.
- Variaciones (de larga duración) del valor eficaz (**rms**). Ejemplo: subtensiones, sobretensiones.
- Distorsiones de onda (armónicas, interarmónicas): caracterizadas por los valores eficaces (**rms**) de las componentes obtenidas utilizando análisis de Fourier.
- Fluctuaciones lentas de tensión: Caracterizadas por indicadores de severidad de flicker (**Pst**, **Plt**).



Valor rms y Análisis de Fourier



$$E = \sqrt{\frac{1}{T_w} \int_0^{T_w} v(t)^2 dt} = V_{rms}$$

$v(t)$ periódica (período T , $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$)

T_w múltiplo entero de T

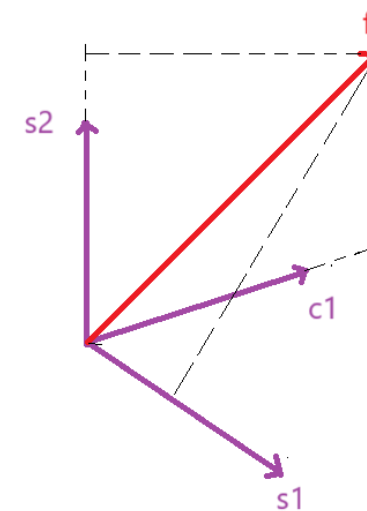
$$f(t) = F_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} F_n \cdot \cos(n\omega_1 t + \theta_n)$$

$$\langle f, g \rangle = \frac{1}{T_w} \int_0^{T_w} f(t) \cdot g(t) dt \quad \|f\| = \sqrt{\frac{1}{T_w} \int_0^{T_w} f(t)^2 dt}$$

$$f(t) = F_0 + \sum_{n=0}^{+\infty} [\langle f, s_n \rangle s_n + \langle f, c_n \rangle c_n]$$

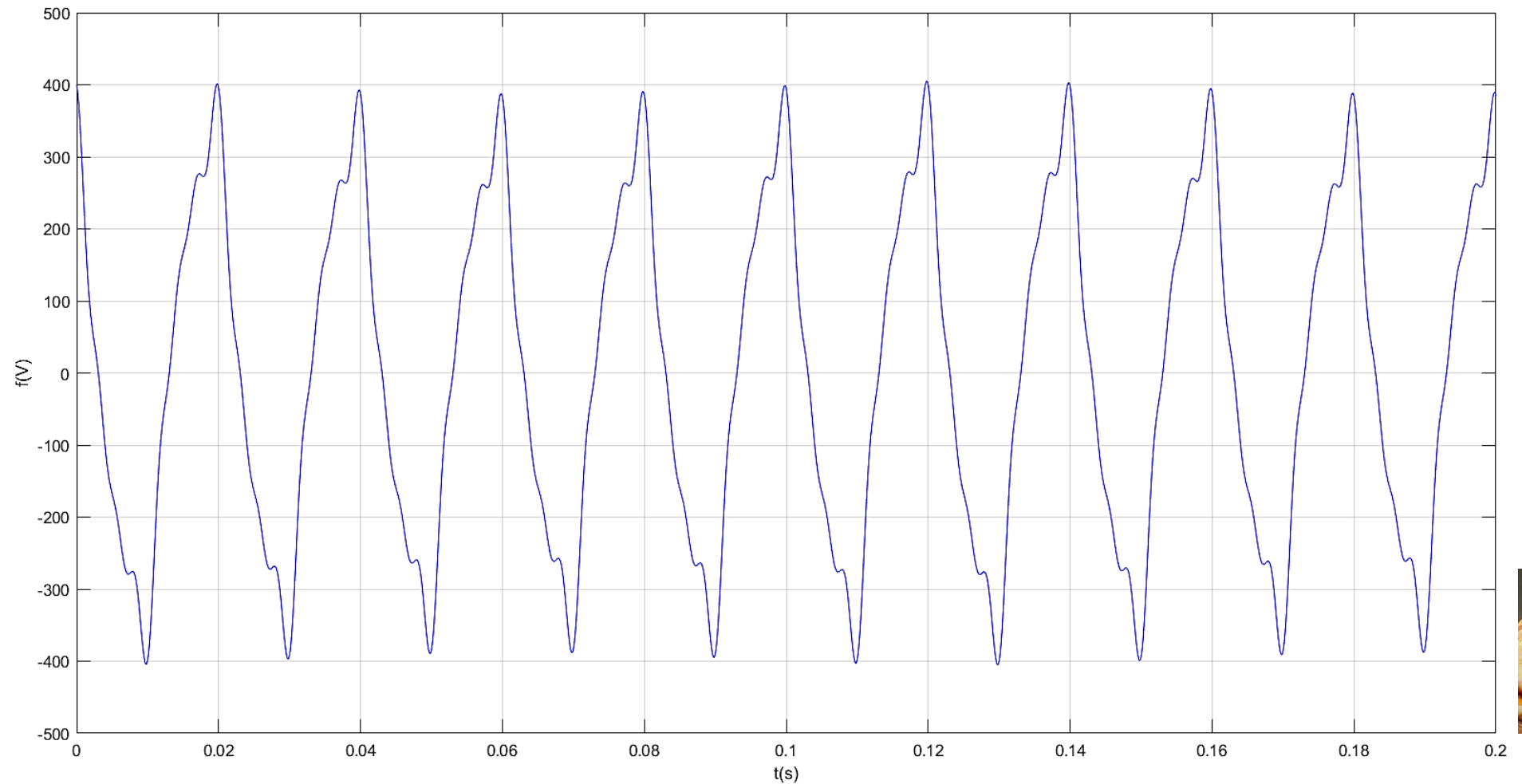
$$s_n(t) = \sqrt{2} \cdot \text{sen}(n\omega_1 t)$$

$$c_n(t) = \sqrt{2} \cdot \text{cos}(n\omega_1 t)$$



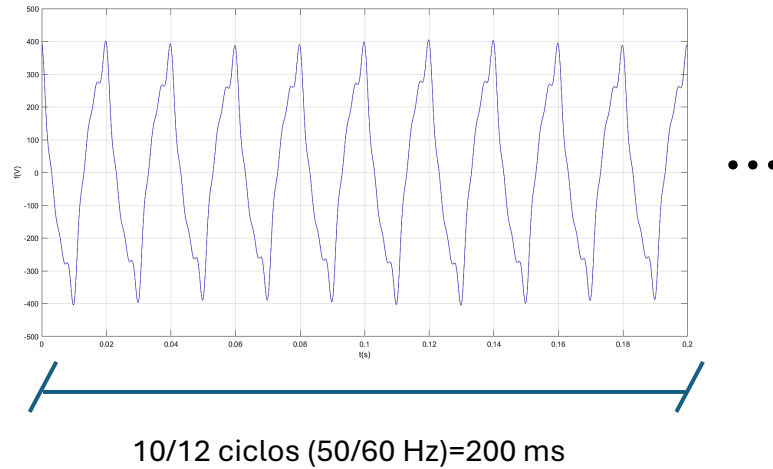


Pero, en los SEPs no existen las señales periódicas...





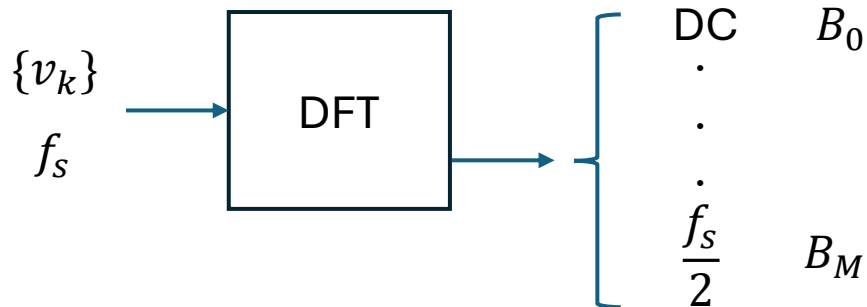
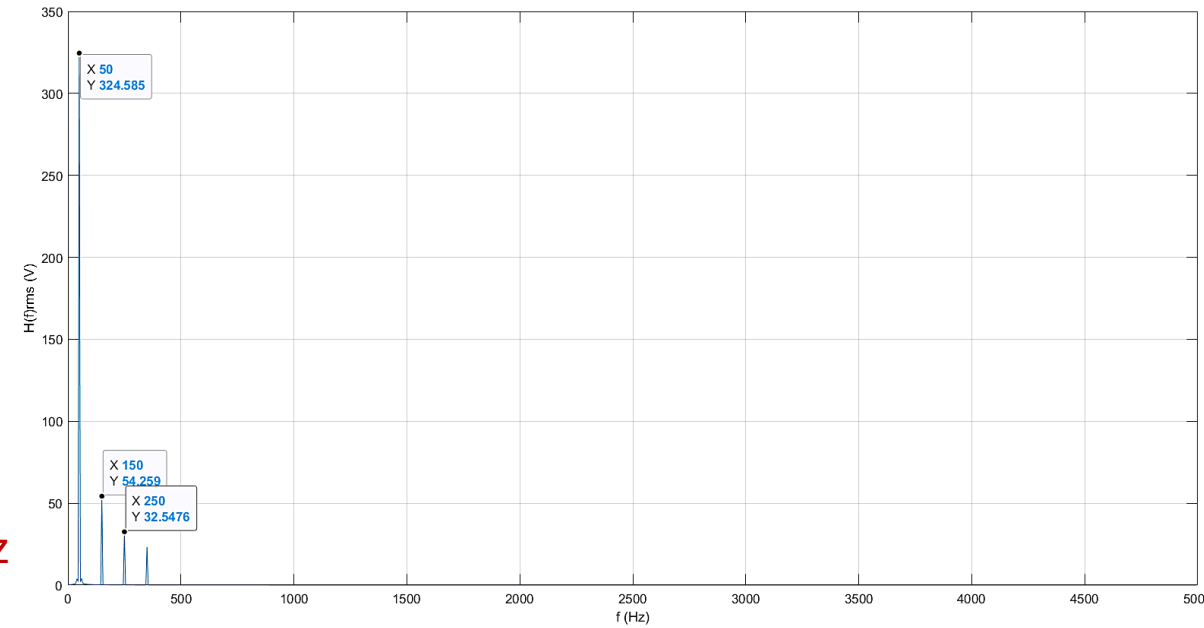
¿Como se ha venido manejando la no periodicidad?



En frecuencia (DFT): $f_{res} = \frac{1}{200\text{ ms}} = 5\text{ Hz}$

Bin 0: DC
 Bin 1: 5 Hz
 Bin 2: 10 Hz

•
 •
 •
 Bin 11: 50 Hz
 •
 •
 Bin 21: 100 Hz
 •
 •
 •

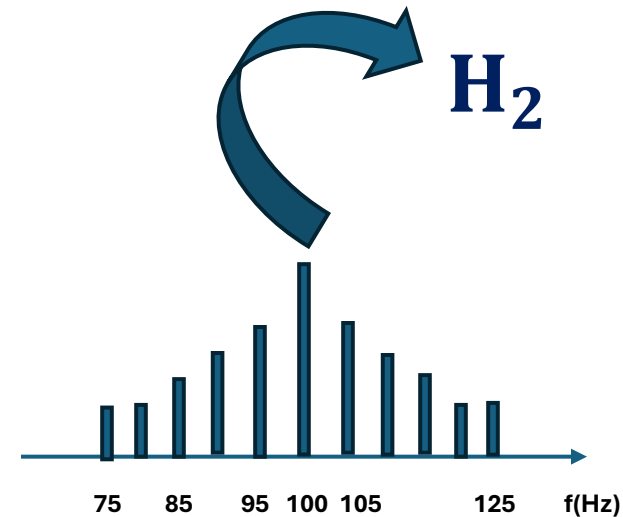




Armónicas y THD

$$H_n^2 = \frac{(B_{10n-4}^2)}{2} + \sum_{i=-4}^4 B_{10n+1+i}^2 + \frac{(B_{10n+4}^2)}{2}$$

$$\text{Ejemplo: } H_2^2 = \frac{B_{16}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 B_{21+i}^2 + \frac{B_{26}^2}{2} \quad (75 \text{ Hz} \leq f \leq 125 \text{ Hz})$$

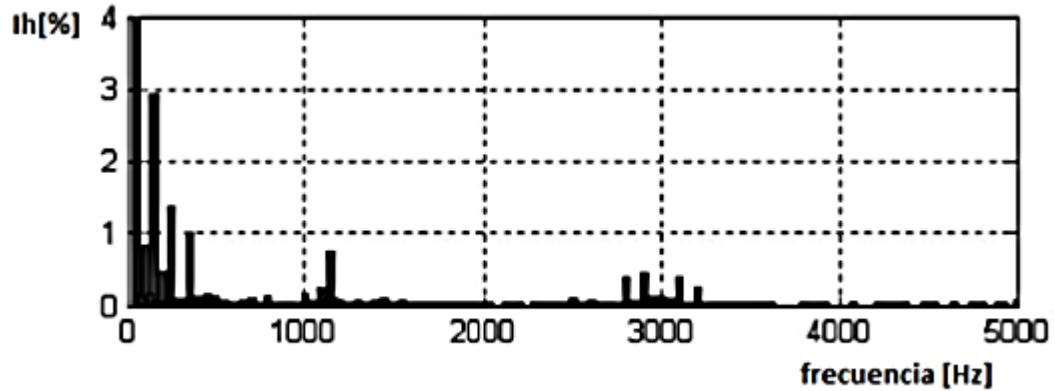
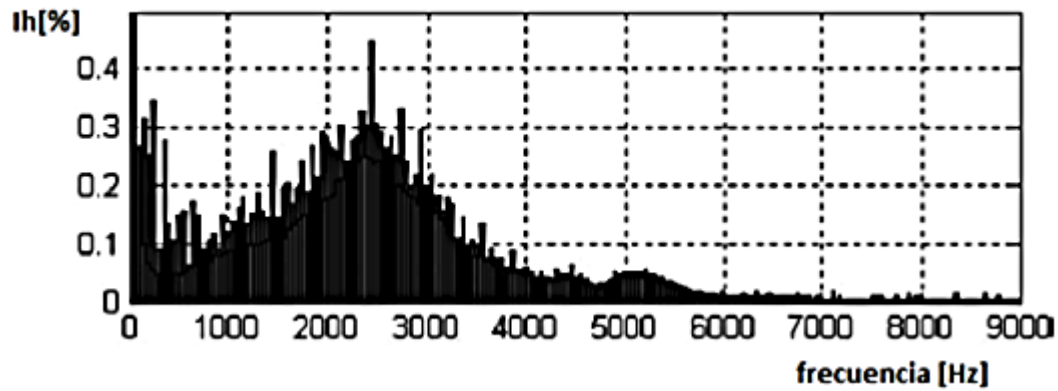


Promedio en intervalo de tiempo mayor: 1 s, 1 m, 10 m
En forma estandarizada: promedio de 3000 medidas en 10 minutos

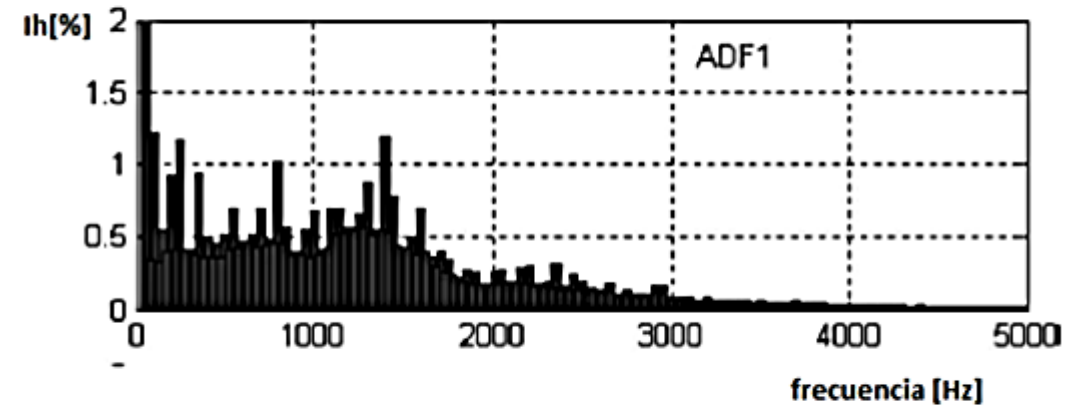
$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{H_n}{H_1}\right)^2} \quad h=40 \text{ o } 50$$



Pero, aparecieron los IBRs...



Interarmónicos



Armónicos AF



¡Socorro! Tranquilos/as... llegó Marc Antoine (Parseval)



$$F_{rms}^2 = \frac{1}{T_w} \int_0^{T_w} f(t)^2 dt = F_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} F_n^2$$

Despreciemos el término DC...

$$F_{rms}^2 = F_{\left[\frac{50}{f_{res}}\right]+1}^2 + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq \left[\frac{50}{f_{res}}\right]+1}}^{\infty} F_n^2$$

$$TD = \sqrt{F_{rms}^2 - F_{50 Hz}^2}$$

Concepto nuevo en IEEE 519 e IEEE 2800

Ventaja: Cuantifica, teóricamente, y para el caso de que la señal tenga solo componentes con frecuencias múltiplos exactos de la *fres*, toda la distorsión de la señal.

Hay que verificar:

TD se comporte igual o mejor que la THD en casos de buen desempeño de la THD

TD sea superior a la THD en capturar la medida de la distorsión en presencia de interarmónicos o armónicos AF



¿Por donde empezamos?



Por un tono puro de distorsión de frecuencia variable

$$f(t) = \sqrt{2}F_{1s} \cdot \text{sen}(\omega_1 t) + \sqrt{2}F_d \cdot \text{sen}(\alpha\omega_1 t)$$

Con la métrica ($\|\cdot\|_2$) propuesta esperamos...

$$\forall \alpha: TD = F_d$$



Sabemos que habrá errores en la “vida real”... Pero...¿”grandes”?

$$\text{Recordamos: } TD = \sqrt{F_{rms}^2 - F_{50 Hz}^2}$$



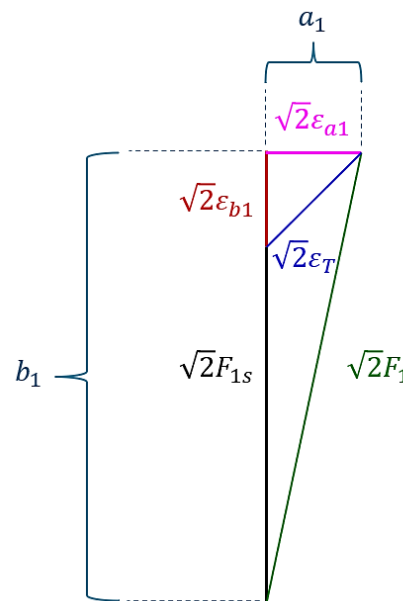
Error en determinar la componente a la frecuencia de la red

$$f(t) = \sqrt{2}F_{1s} \cdot \text{sen}(\omega_1 t) + \sqrt{2}F_d \cdot \text{sen}(\alpha\omega_1 t)$$

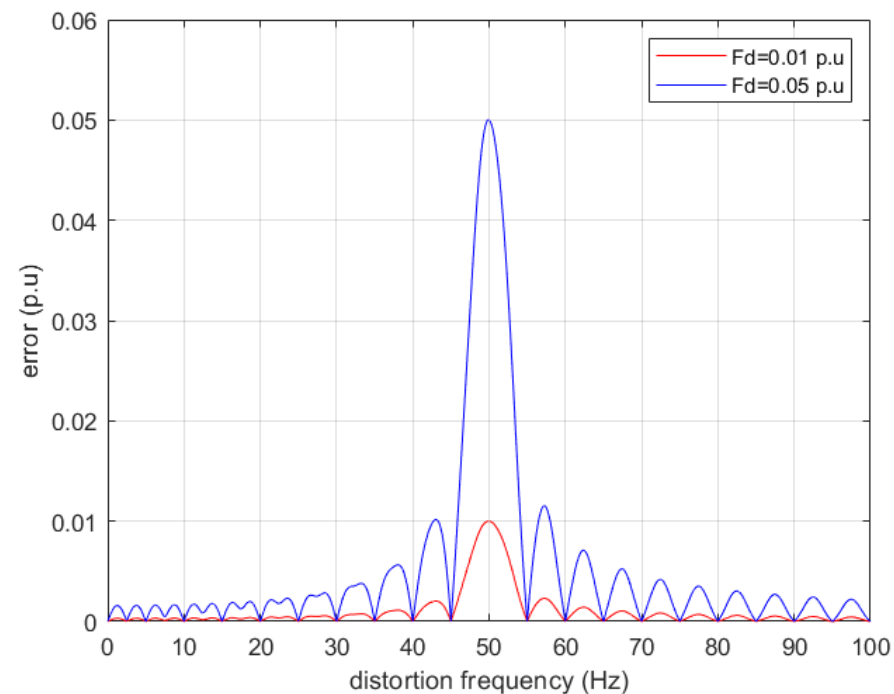
$$F_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$$

$$a_1 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(\omega_1 t) dt$$

$$b_1 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(\omega_1 t) dt$$



$$\epsilon_T = \sqrt{\epsilon_{a1}^2 + \epsilon_{b1}^2}$$



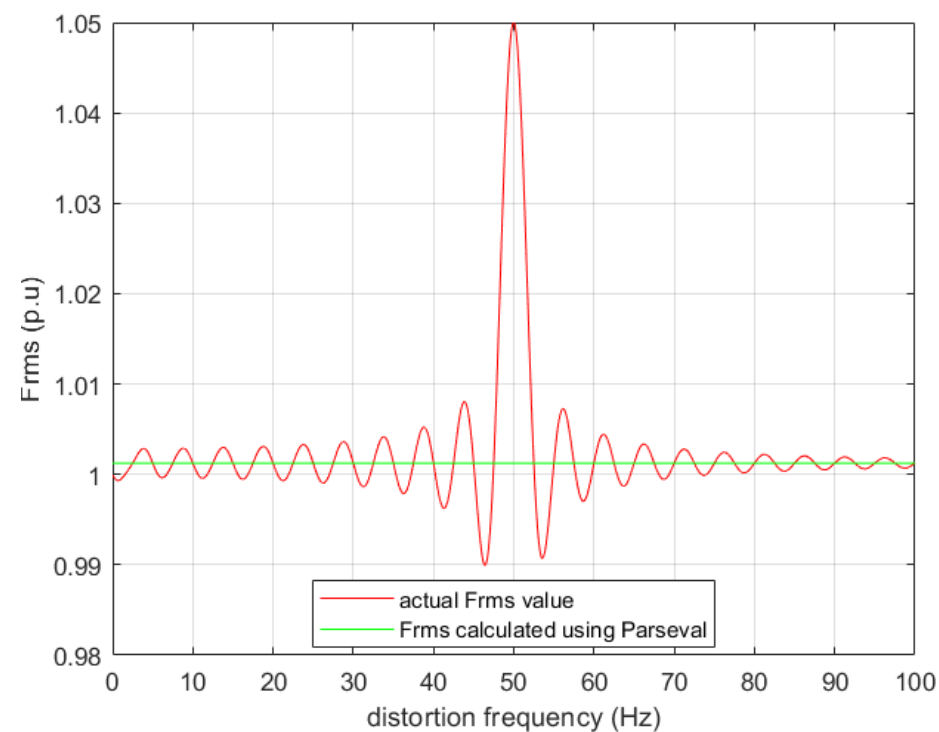


Influencia de la distorsión en el valor rms

$$F_{rms} = \sqrt{F_{1s}^2 + F_d^2 - F_d^2 \frac{\sin(2\alpha\omega_1 T)}{2\alpha\omega_1 T} + 2F_{1s}\epsilon_{b1}}$$



*f ≠ k * 2.5 Hz grrrrr!*

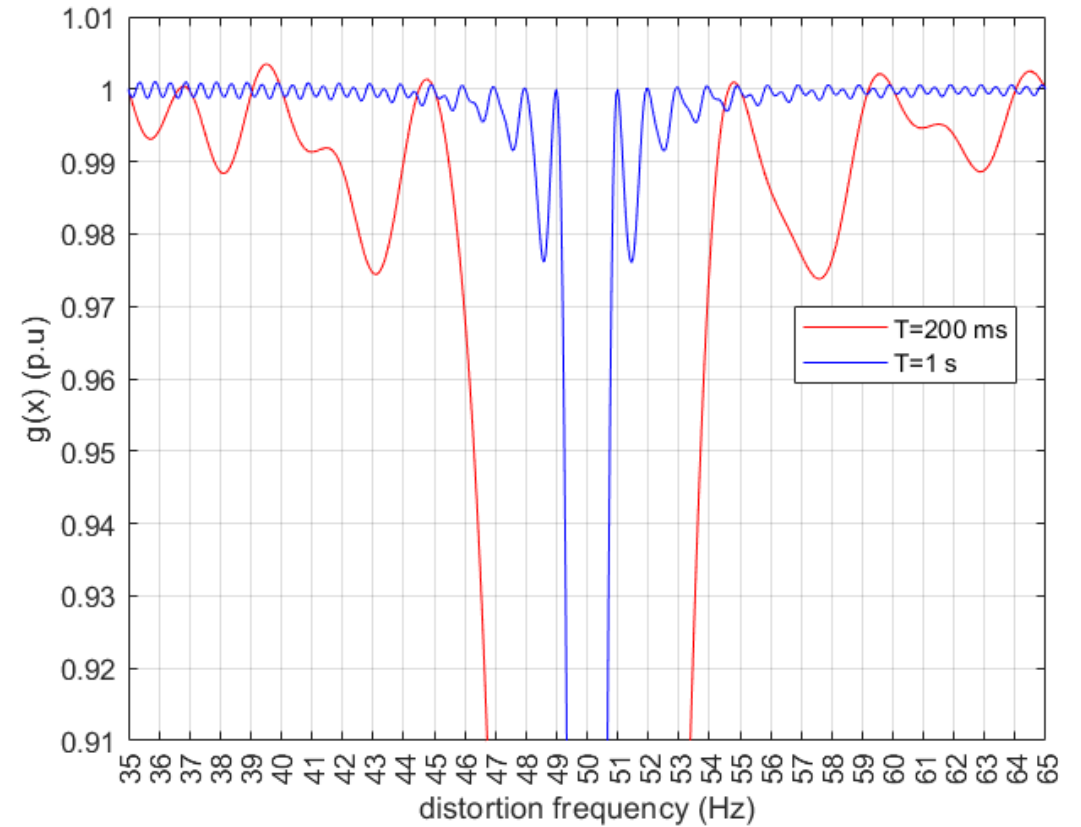
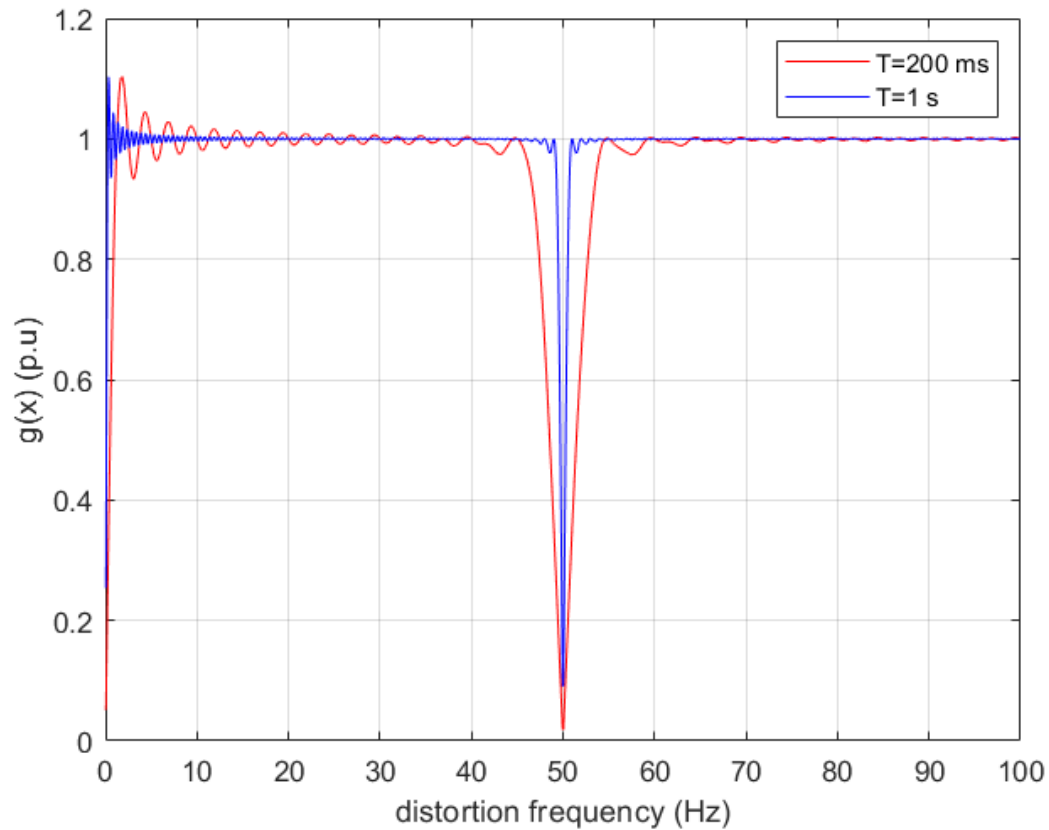




Error en TD

$$TD = F_d \cdot g(\alpha\omega_1 T)$$

$$g(\alpha\omega_1 T) = \sqrt{\left(1 - \left[\frac{\sin(2\alpha\omega_1 T)}{2\alpha\omega_1 T} + \varepsilon_{TN}^2\right]\right)}$$





Comparación TD vs THD

$$f(t) = \sqrt{2}F_{1s} \cdot \text{sen}(\omega_1 t) + \sqrt{2}F_d \cdot \text{sen}(\alpha\omega_1 t)$$

$$F_{1s} = 1$$

$$F_d = 0.05 \text{ (distorsión 5\%)}$$

$$T_w = 200 \text{ ms} \quad (f_{res} = 5 \text{ Hz})$$

f_d (Hz)	THD (p.u.)	THD error (%)	TD (p.u.)	TD error (%)
51	0.0015	-97.0	0.0177	-64.6
250	0.0500	0	0.0500	0
579	0.0030	-94.0	0.0500	0
5092.5	1.34e-5	-100.0	0.0500	0



Conclusiones y trabajo a futuro

Para tonos puros, TD funciona razonablemente bien fuera del rango $\text{fred} \pm 1/T_w$ Hz. Para $T_w=200$ ms, período normalizado actual de medición, funciona bien fuera del rango 45 Hz – 55 Hz. Merece análisis el cambio de $T_w=200$ ms a $T_w=1$ s.

TD computa bien, entonces, tonos puros interarmónicos lejanos a la frecuencia de red, armónicos hasta 2-3 kHz, y armónicos de alta frecuencia.

TD no computa bien los tonos puros de frecuencia cercana a la frecuencia de red. Por lo tanto, la métrica subyacente no es adecuada para las fluctuaciones lentas de tensión asociadas a flicker. Para esta clase de distorsión se tiene que continuar con la métrica actual (indicadores de severidad de flicker) o cambiar por otra diferente a TD.

Trabajo en curso:

Efecto del aliasing en la determinación de la componente fundamental.

Nueva métrica para cuantificar fluctuaciones lentas de tensión.



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



¡Muchas gracias por la atención!

¿Comentarios? ¿Preguntas?