

MÉTODOS DE MEDICIÓN DE CALIDAD DE LA POTENCIA ELÉCTRICA

IEC 61000.4-7 Y 4.30

René D. Carranza López Padilla

Sergio A. Campos Montiel

Adrián J. Castruita

Octubre 6 y 7, 2014

Contenido:

1. Introducción: IEC 61000 4-30 / 4-7
2. Clases de desempeño de medidores de calidad de la energía eléctrica
3. Métodos de medición de parámetros de calidad de la energía eléctrica
4. Magnitudes de influencia en la medición de parámetros de la energía eléctrica

Reto mundial: Calidad de la Potencia Eléctrica



Calentamiento de neutro: desbalance

Resonancia por armónicas

Pérdidas V^2/R

Flicker

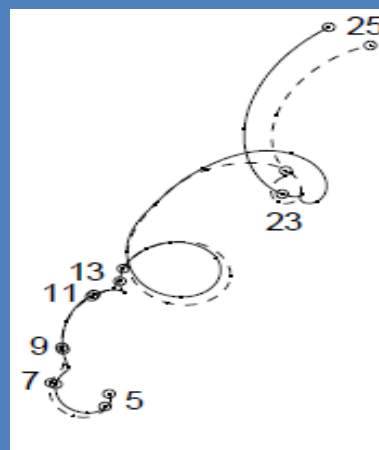
Pérdidas en procesos industriales

Estudio reciente:

En Europa, los costos relacionados con la Calidad de la Potencia son responsables de una seria reducción del desempeño industrial, con un impacto económico que excede € 150 000 millones/año



Calidad de la Potencia en Área Amplia (digitalizadores sincronizados por GPS,

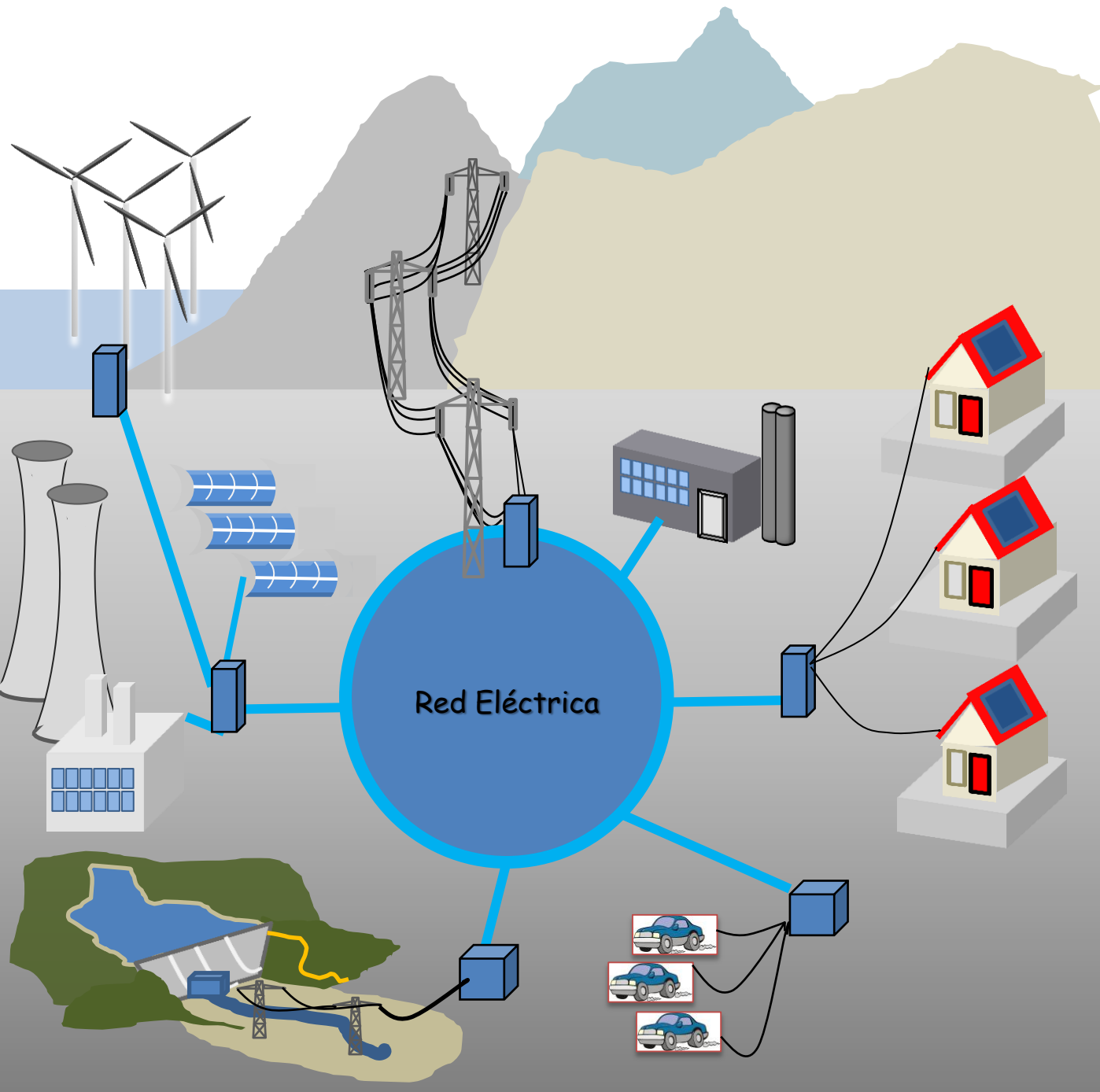


Impedancia de la Red (mediciones de campo VS modelos de red)



Pruebas de campo de Energías Renovables (CP y Eficiencia Energética,

Redes Eléctricas y Calidad de la Potencia



- Flujo bidireccional de potencia
- Generación remota y local
- Control de Redes de Área Amplia (WANs)
- Fuentes fluctuantes de energía (eólica, fotovoltaico)
- Carga no-lineal y difícil de predecir

RETOS

- Control DINÁMICO de redes
- Calidad de la potencia en tiempo real

**Patrones Nacionales
CENAM**

**Patrón de Referencia
Parámetros de Calidad de la
Potencia Eléctrica
CENAM**

**Normatividad
nacional e
internacional**

**IEC 61000-4-30
IEC 61000-4-7**

Ámbito de
estudio de
Metrología
Calidad
de la
Potencia
Eléctrica

**Patrones Referencia
Laboratorios
acreditados**



**Instrumentos de medición
INDUSTRIA
Usuarios en general**



IEC 61000 – 4 – 30 /2010 : métodos de medición de calidad de la potencia

Definición de condiciones de medición de los parámetros de calidad:

- asegurar la comparabilidad de las mediciones sin importar el instrumento utilizado
- asegurar que el método de medición que utiliza un medidor, mide el mensurando de interés
- cuál es el efecto de los transductores de los medidores de calidad de la potencia eléctrica

Documentos de referencia

IEC 61000-4-30

Métodos de medición e interpretación de resultados de medición de parámetros de calidad de la potencia

IEC 61000-4-7

Requerimientos de instrumentos para medir componentes espectrales en frecuencias hasta 9 kHz.

Parámetros de calidad de potencia IEC 61 000 partes 4-30, 4-7 y 4-15

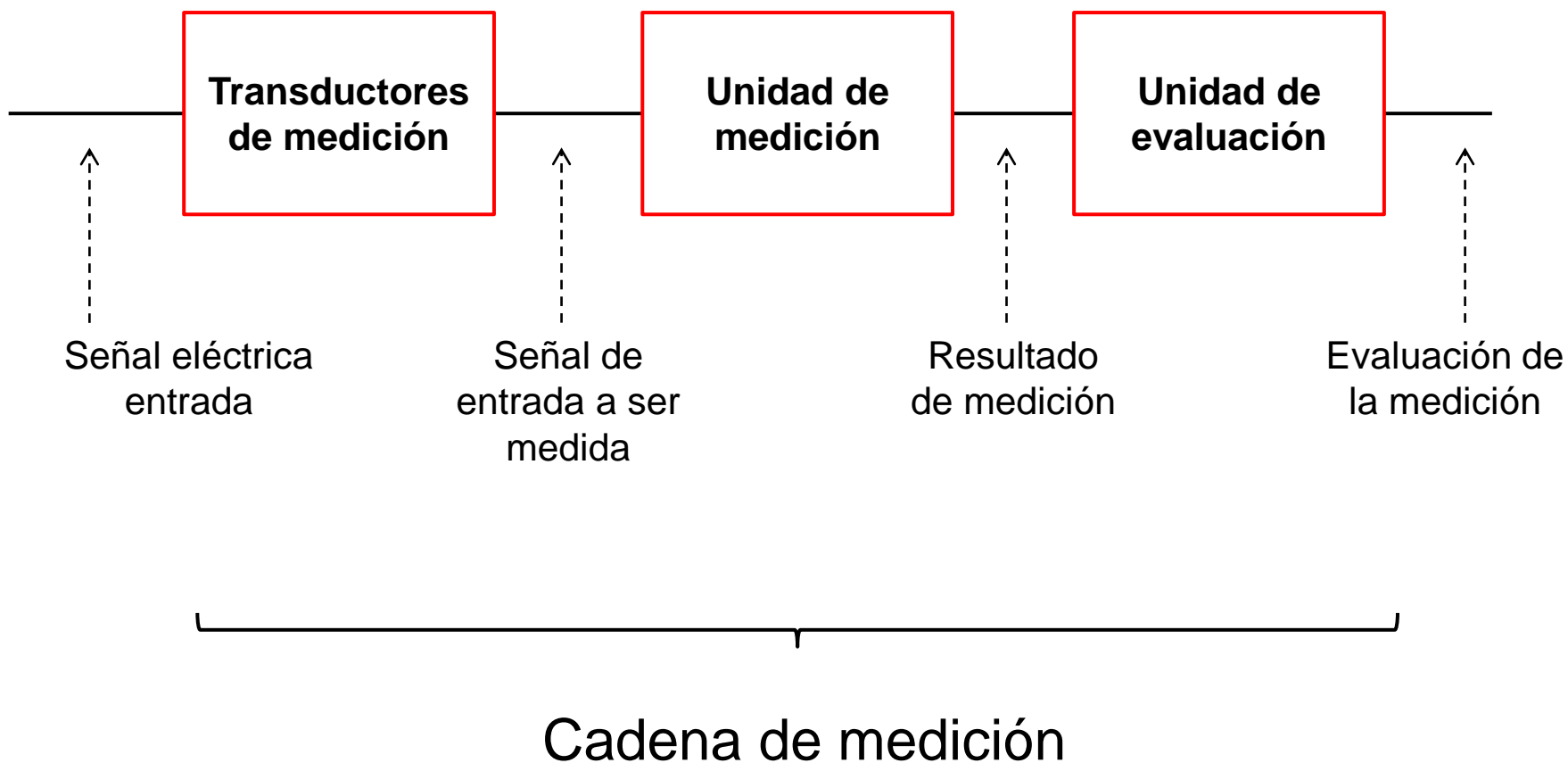
Dominio	Parámetro	4-30	4-7	4-15
del Tiempo	amplitud	✓		
	abatimiento/decaimiento	✓		
	interrupciones	✓		
	transitorios	✓		
	desbalance	✓		
	cambios abruptos	✓		
	desviación por arriba / por abajo	✓		
	frecuencia del suministro	✓		
de la Frecuencia	armónicas de tensión		✓	
	inter armónicas de tensión		✓	
	señalización en tensión		✓	
Tiempo-Frecuencia	parpadeo (flicker)			✓

IEC 61 000 4-30-2010

Definiciones básicas

Símbolo	Parámetro
U_C	Valor declarado de tensión del suministro. Normalmente es el valor nominal del sistema U_N
U_N	Valor nominal del sistema
U_{din}	Valor obtenido de la tensión declarada por un transductor de relación (transformador)
RTR	Reloj de tiempo real en el medidor. Usualmente es sincronizado con el GPS
RCM	Valor raíz cuadrático medio
$U_{RCM(1)}$	valor RCM de tensión, refrescado cada ciclo
$U_{RCM(1/2)}$	Valor RCM de tensión, refrescado cada medio ciclo
U_{res}	Tensión residual
U_{SR}	Tensión de referencia de deslizamiento

Organización de las mediciones



2.

- **Clases de desempeño**
- **Agregación de tiempos de medición**
- **Abanderamiento (flagging)**

IEC 61000-4-30/2010: clases de método de medición A, S, B

Desempeño Clase A (advanced):

- para mediciones de precisión (aplicaciones contractuales; evaluación conformidad con normas; disputas)
- cualquier medición de algún parámetro, que sea realizada por dos medidores distintos de clase A, cuando midan la misma señal, producirán resultados comparables dentro de la incertidumbre especificada
- medición de eventos en estado estable (**condiciones estacionarias**)

Desempeño Clase S (survey):

- mediciones para estadísticas; identificación de problemas en sistemas de potencia; aplicaciones que no requieren baja incertidumbre
- medición de eventos en estado transitorio (**condiciones no estacionarias**)

Desempeño Clase B (basic):

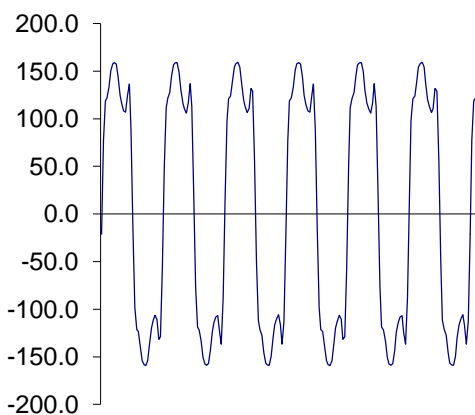
- se usa para evitar hacer obsoletos algunos diseños existentes. No usar Clase B en nuevos instrumentos de medición

IEC 61000 – 4 – 30 /2010 : clases A y B

Clase A:

- para mediciones de precisión: condiciones establecidas en contratos de servicio, evaluación de la conformidad (aprobación de modelo), tercerías
- los resultados de medición de un mismo parámetro realizados por dos instrumentos de medición clase A, deben ser comparables dentro de su incertidumbre

Ejemplo: ¿Cuáles de estos medidores son comparables dentro de su incertidumbre?

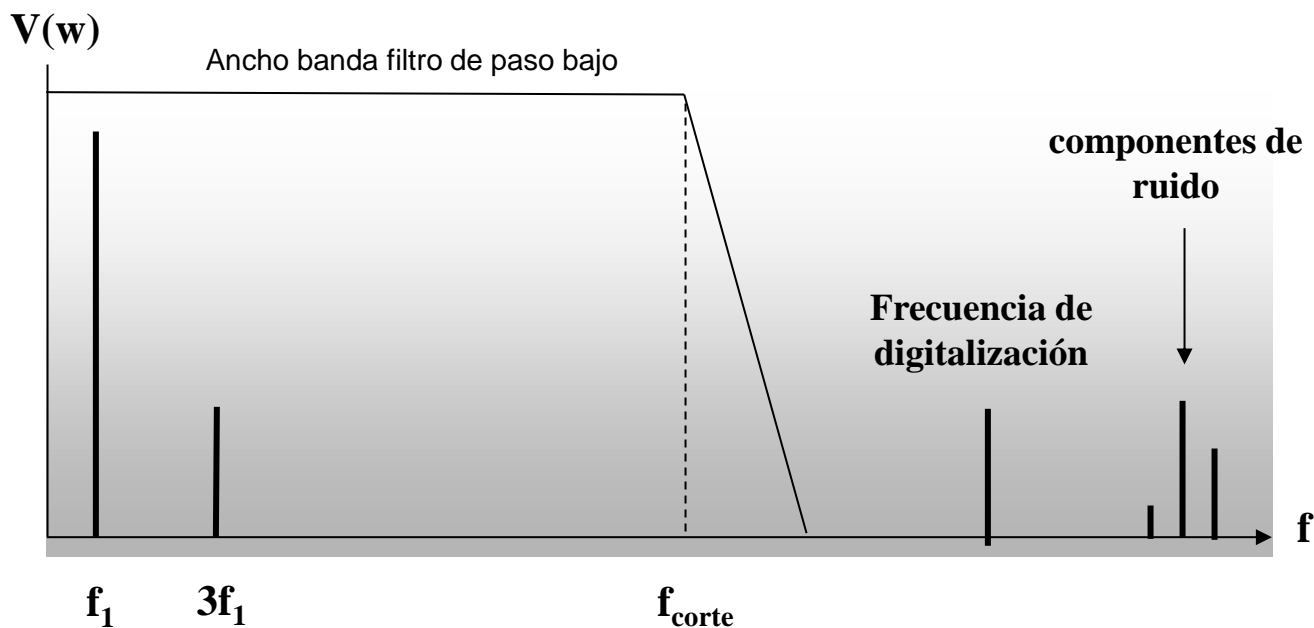


Medidor	V_{RCM} \pm incertidumbre
1	120.1 \pm 2.5 %
2	123.1 \pm 1.5 %
3	117.4 \pm 2.0 %
4	115.9 \pm 1.5 %

IEC 61000 – 4 – 30

Clase A:

- se requieren anchos de banda amplios
ancho de banda $\gg mf_1$ m = armónica de mayor orden
- y frecuencias de digitalización grandes:
 $f_{\text{dig}} \gg f_{\text{corte}}$

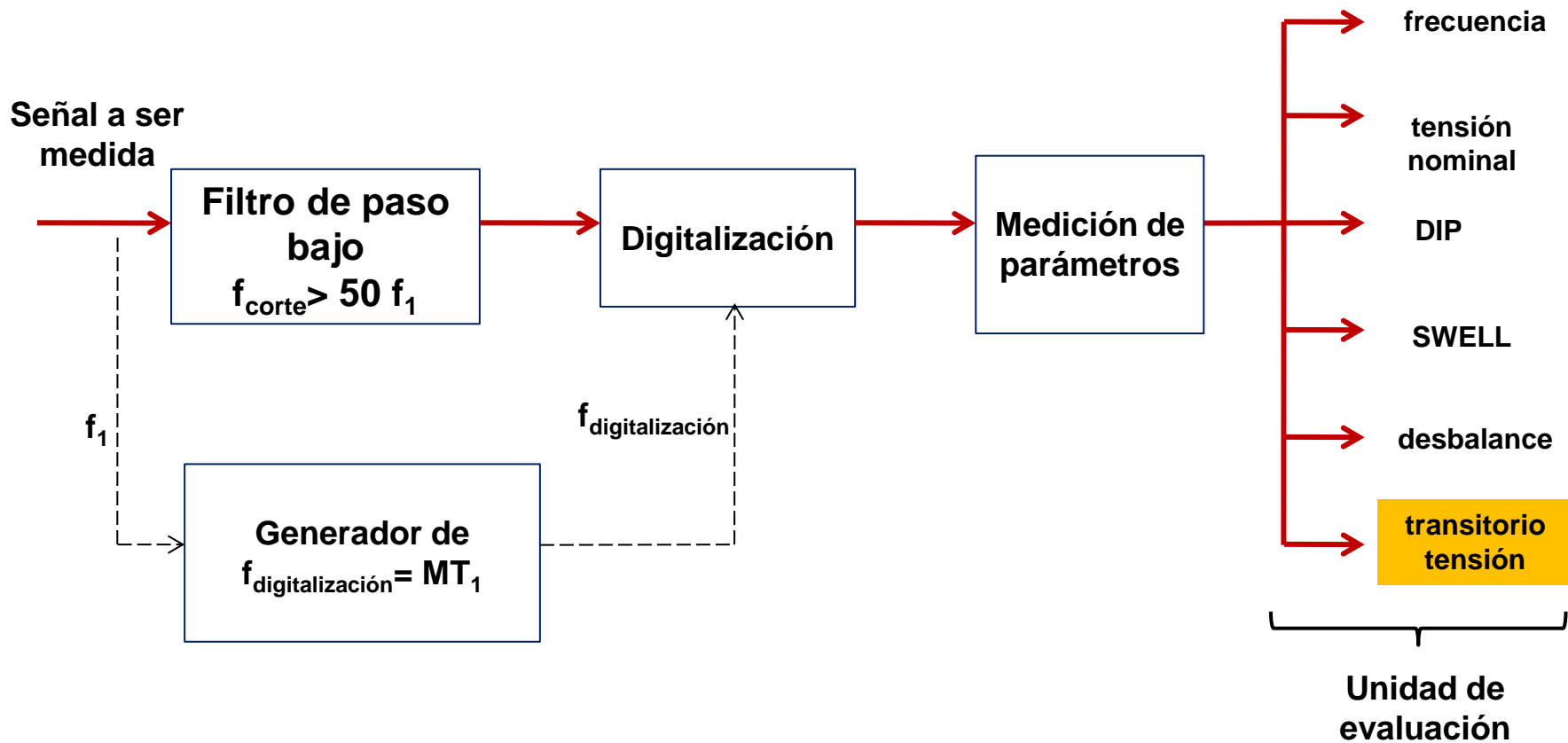


IEC 61000 – 4 – 30 /2010. Abanderamiento (flagging)

- Durante un transitorio de amplitud de la señal (dip-sag/swell/interrupción), se pueden afectar otro tipo de mediciones.
- El abanderamiento evita contar un único evento más de una vez en diferentes parámetros; indica que un valor agregado puede no ser confiable
- Banderas: dip-sag / swell / interrupción
- Abanderamiento aplica para clases A y S durante la medición de armónicos e interarmónicos, frecuencia, amplitud de tensión, flicker; desbalance del suministro; señalización; y en la medición de parámetros de desviación arriba/abajo
- Si durante un intervalo de tiempo cualquier valor es abanderado, el valor agregado que incluya ese valor también debe ser abanderado.
- El valor abanderado debe guardarse e incluirse en el proceso de agregación.

3. Mediciones en el dominio del tiempo

3. Mediciones en el dominio del tiempo



3. Mensurando: señal eléctrica

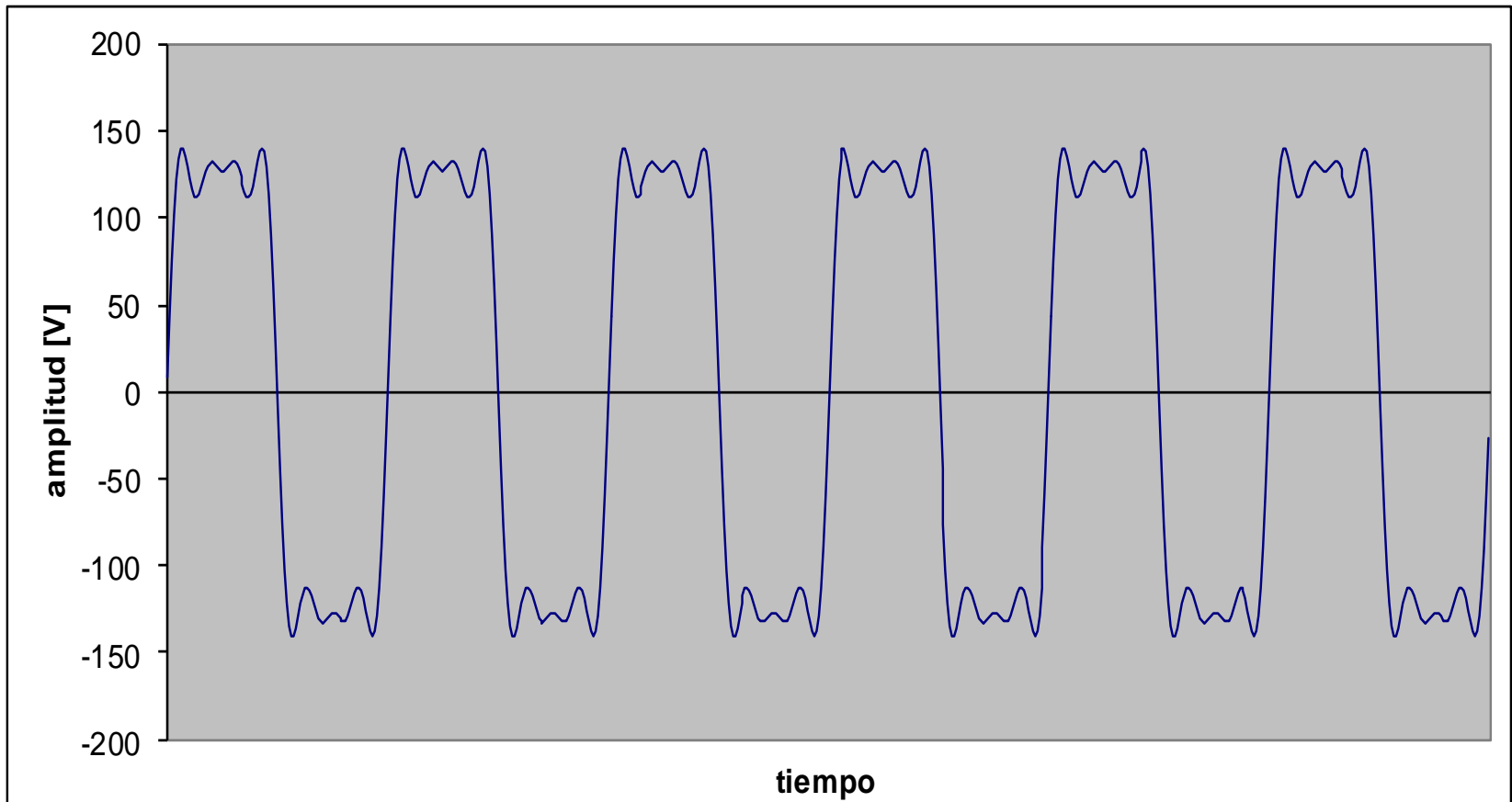
$$v(t) = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{tensión} \\ \text{eléctrica}}}{V_0} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{componente} \\ \text{de CC}}}{V_1(t)} \underbrace{\text{sen}[\phi_1(t)]}_{\substack{\text{componente de} \\ \text{frecuencia} \\ \text{fundamental}}} + \underbrace{\sum_{h=2}^H V_h(t) \text{sen}[\phi_h(t)]}_{\substack{\text{armónicos } h=2 \dots H}} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{ruido aditivo}}}{r(t)}$$

Componentes	Modelo matemático	Parámetros de calidad de la energía
Componente de CC	V_0	
Frecuencia fundamental	$V_1(t) \text{sen}[\phi_1(t)]$	Amplitud $V_1(t)$ Frecuencia $\phi_1(t) = 2\pi f_1(t)t + \Theta_1(t)$ $f_{inst}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_1(t)}{dt}$
Armónicos $h=2 \dots H$	$\sum_{h=2}^H V_h(t) \text{sen}[\phi_h(t)]$	Amplitud de armónicos Frecuencia y fase de armónicos
Ruido aditivo	$r(t)$	Inter/sub armónicos Señalización en la red eléctrica Ruido electromagnético de banda ancha

$$v(t) = \cancel{V_0}^0 + V_1(t) \text{sen}[\phi_1(t)] + \sum_{h=2}^H V_n(t) \text{sen}[\phi_h(t)] + \cancel{r(t)}^0$$

Ejemplo:

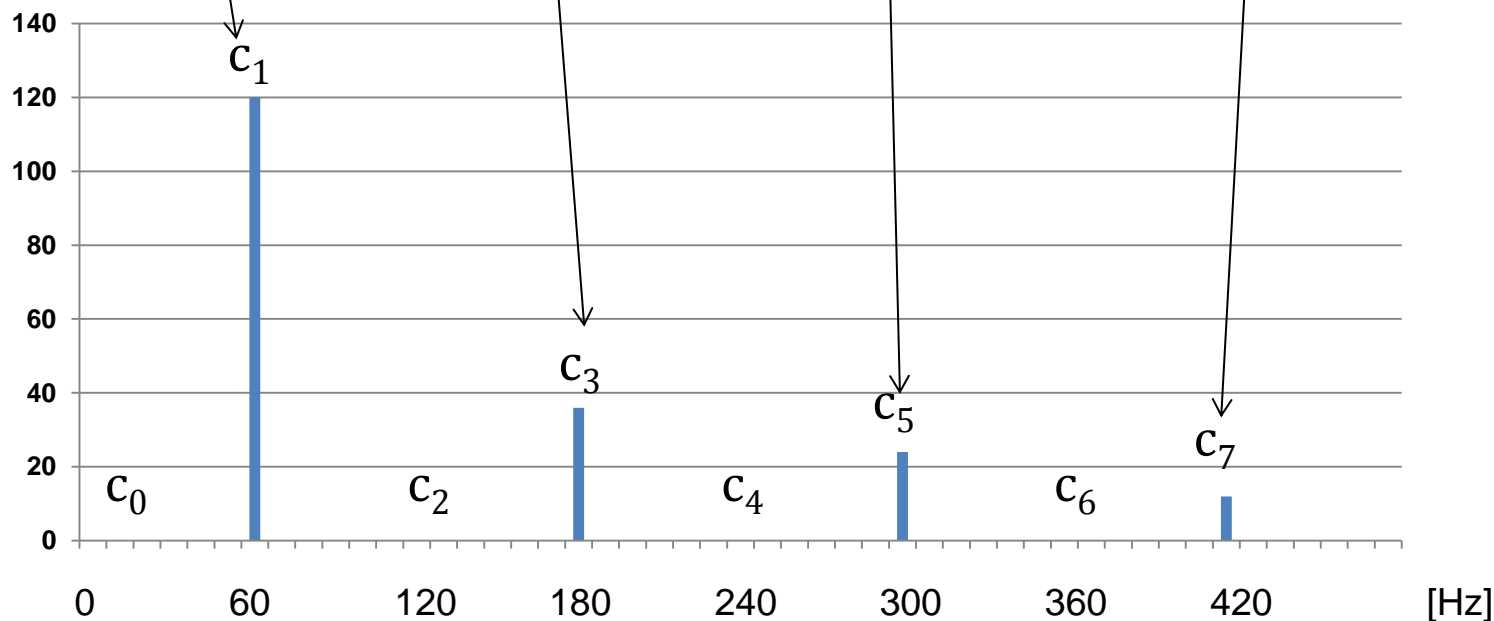
$$v(t) = 120\text{sen}(2\pi 60t) + 36\text{sen}(2\pi 180t) + 24\text{sen}(2\pi 300t) + 12\text{sen}(2\pi 420t)$$



$$v(t) = c_0 + \sum_{k=1}^7 c_k \text{sen}\left(\frac{k}{N} w_1 t + \varphi_k\right)$$

$f_1 = 60 \text{ Hz}$

$$v(t) = 120\text{sen}(2\pi 60t) + 36\text{sen}(2\pi 180t) + 24\text{sen}(2\pi 300t) + 12\text{sen}(2\pi 420t)$$



4. Métodos de medición de frecuencia

IEC 61000-4-30: medición de armónicos

Método de medición

Clase A: se define como **Clase I en IEC 61000-4-7**. Esta norma se usa para determinar la medición continua de armónicas de subgrupo de 12 ciclos (60 Hz) y se denota como $U_{sg,h}$

Las mediciones se deben realizar al menos hasta la armónica 50

La distorsión armónica total se calcula como la distorsión armónica total de subgrupo (*THDS*).

Clase S: se define como **Clase II en IEC 61000-4-7**. Se permite la medición discontinua de armónica. El fabricante debe seleccionar la medición del grupo de armónicas de 12 ciclos $U_{g,h}$, o la medición del subgrupo $U_{sg,h}$.

Si la distorsión armónica total se calcula, se deberá calcular como la distorsión armónica total (*THD*), o la distorsión armónica total de subgrupo (*THDS*)

Definición relacionada con el análisis de frecuencia

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \text{sen}\left(\frac{k}{N}w_1 t + \varphi_k\right)$$

$w_1 = 2\pi f_{H,1}$: frecuencia fundamental

k : número de línea espectral en el análisis de Transformada de Fourier

N : número de periodos de la fundamental dentro de la ventana de medición

T_N : duración de la ventana de medición

c_0 : componente de corriente continua

c_k : amplitud de la componente k con frecuencia $f_{C,k} = \frac{k}{N}f_{H,1}$

$Y_{C,k}$: valor RCM de la componente c_k

φ_k : ángulo de fase de la línea espectral k

Notas IEC 61000 parte 4-7

- Estas definiciones aplican para condiciones estacionarias (Estables)
- Se puede aplicar la Transformada Discreta de Fourier (TDF), o la Transformada Rápida de Fourier (TRF)
- La señal $f(t)$ se digitaliza mediante convertidor A-D
- Cada grupo de M muestras forma una ventana de tiempo con duración T_N sobre la cual se obtiene la TDF o TRF
- T_N determina la resolución de frecuencia de TDF:

$$TDF_{BIN} = f_{C,1} = 1/T_N$$

- La duración de la ventana de tiempo T_N debe ser múltiplo entero del periodo fundamental de $f(t)$.

$$T_N = N T_1$$

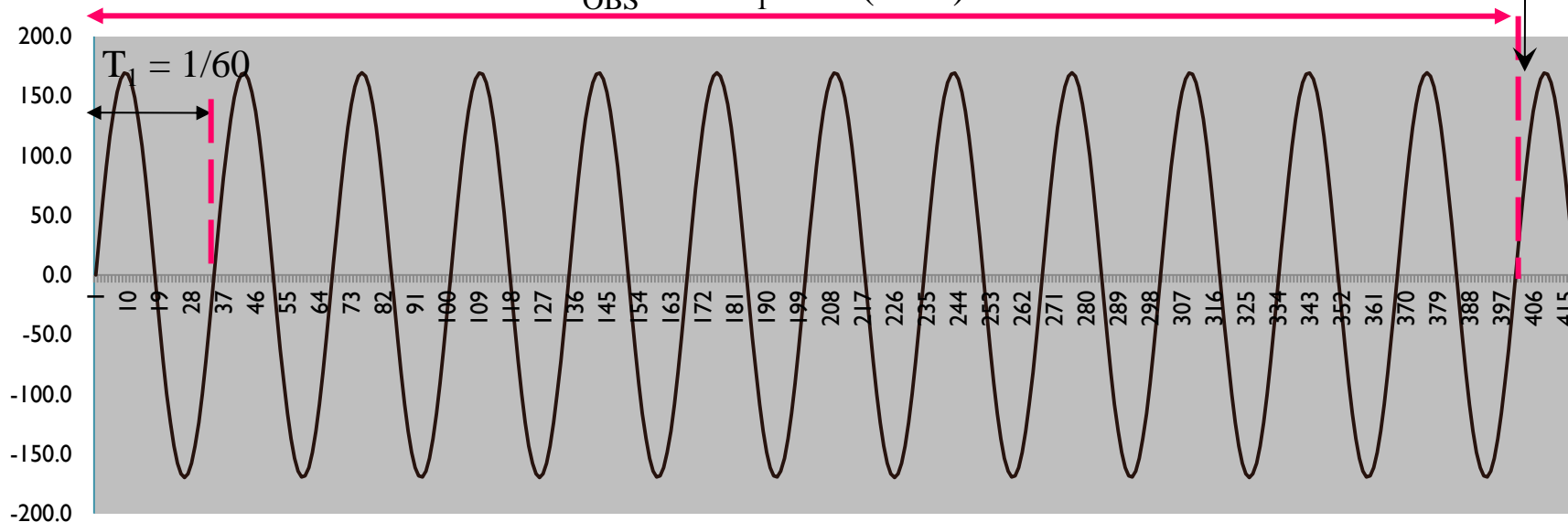
- La frecuencia de digitalización es $f_s = \frac{M}{NT_1}$

**Sincronización de
frecuencia de
digitalización con la
frecuencia fundamental**

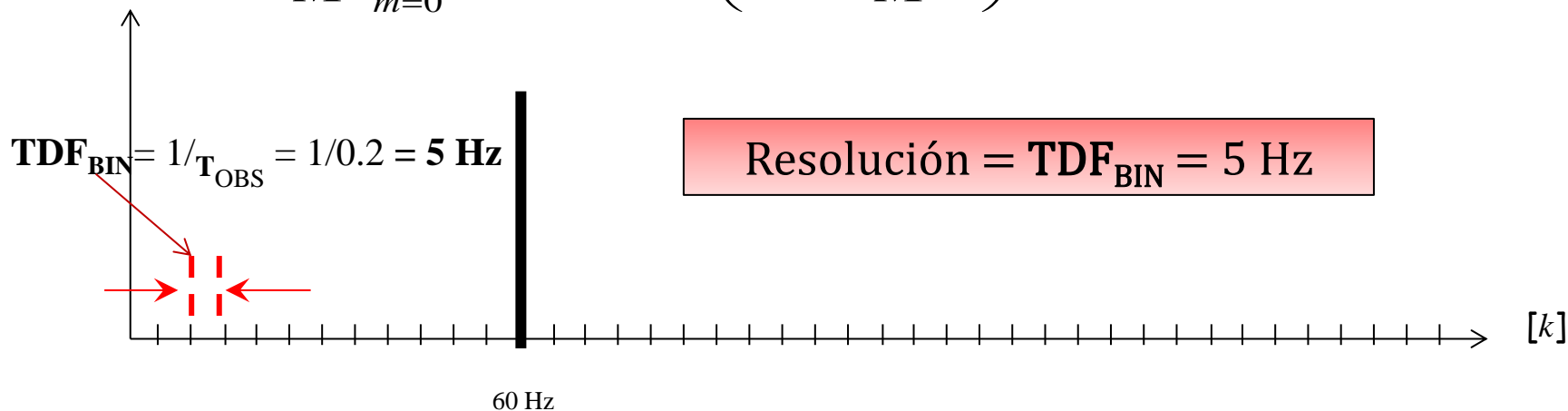
Transformada de Fourier: análisis tiempo-frecuencia

$N = 12$

$$T_{\text{OBS}} = N T_1 = 12(1/60) = 200 \text{ ms}$$



$$V[k] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} v[m\Delta t] \exp\left(-j \frac{2\pi km}{M}\right) \quad \text{para } k = 0, 1, 2, \dots, K-1$$



IEC 61000-4-7: Requisitos de exactitud

La Tabla 1 muestra los requisitos de exactitud para instrumentos de medición Clase I y II.

El error máximo permitido en Tabla 1 se refiere a señales de una frecuencia y en condiciones estables dentro del intervalo de frecuencia de operación que indique el fabricante.

Frecuencias fuera del intervalo de medición del instrumento debe ser atenuadas para no afectar los resultados.

IEC 61000-4-7: Tabla 1. Requisitos de exactitud para medición de corriente, tensión y potencia

Clase	Medición	Condiciones	Error máximo
I	Tensión	$U_m \geq 1\% U_{nom}$ $U_m < 1\% U_{nom}$	$\pm 5\% U_m$ $\pm 0.05\% U_{nom}$
	Corriente	$I_m \geq 3\% I_{nom}$ $I_m < 3\% I_{nom}$	$\pm 5\% I_m$ $\pm 0.15\% I_{nom}$
	Potencia	$P_m \geq 150\text{ W}$ $P_m < 150\text{ W}$	$\pm 1\% P_m$ $\pm 1.5\text{ W}$
II	Tensión	$U_m \geq 3\% U_{nom}$ $U_m < 3\% U_{nom}$	$\pm 5\% U_m$ $\pm 0.15\% U_{nom}$
	Corriente	$I_m \geq 10\% I_{nom}$ $I_m < 10\% I_{nom}$	$\pm 5\% I_m$ $\pm 0.5\% I_{nom}$

I_{nom} : intervalo de corriente nominal del instrumento de medición

U_{nom} : intervalo de tensión nominal del instrumento de medición

U_m , I_m y P_m : valores medidos

NOTA 1. Instrumentos Clase I se recomiendan donde mediciones precisas son necesarias, tales como verificar cumplimiento con normas, resolución de disputas, etc. Dos instrumentos cualquiera que cumplan con los requisitos de Clase I, cuando se conecten a una misma señal, producirán resultados comparables dentro de la exactitud especificada, o indicada en condición de sobre carga.

Nota 2. Instrumentos Clase II se recomienda para mediciones de emisión, para encuestas generales. Se recomienda para medición de emisiones si los valores son tales que, aún cuando se permita una incertidumbre ampliada, sea claro que los límites no son excedidos. En la práctica, esto significa que los valores medidos de armónicas deben ser < 90 % de los límites permitidos

Análisis Espectral. IEC 61000 4 7

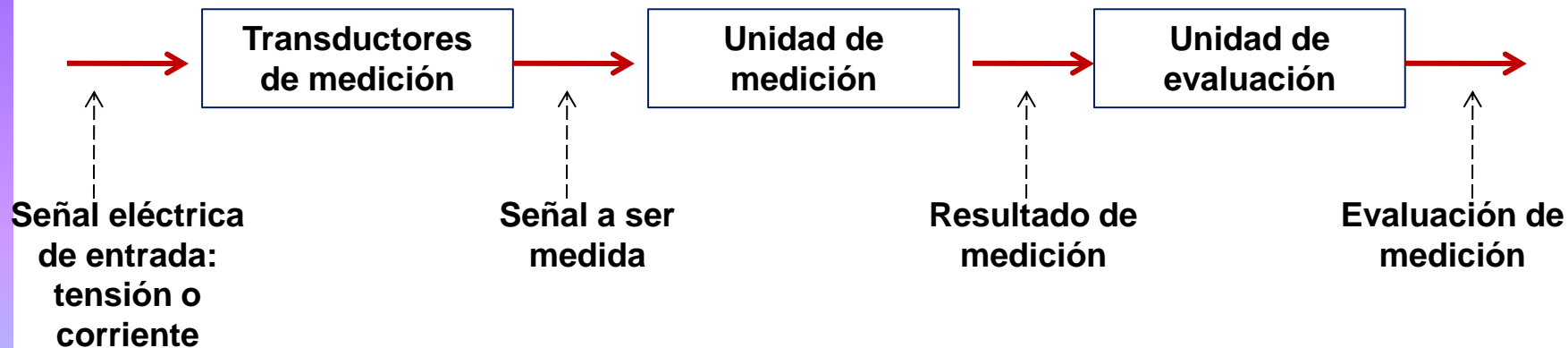
se apoya expresamente en la técnica de análisis espectral de la **Transformada Discreta de Fourier**.

- acepta otras técnicas de análisis como la Transformada Wavelet.

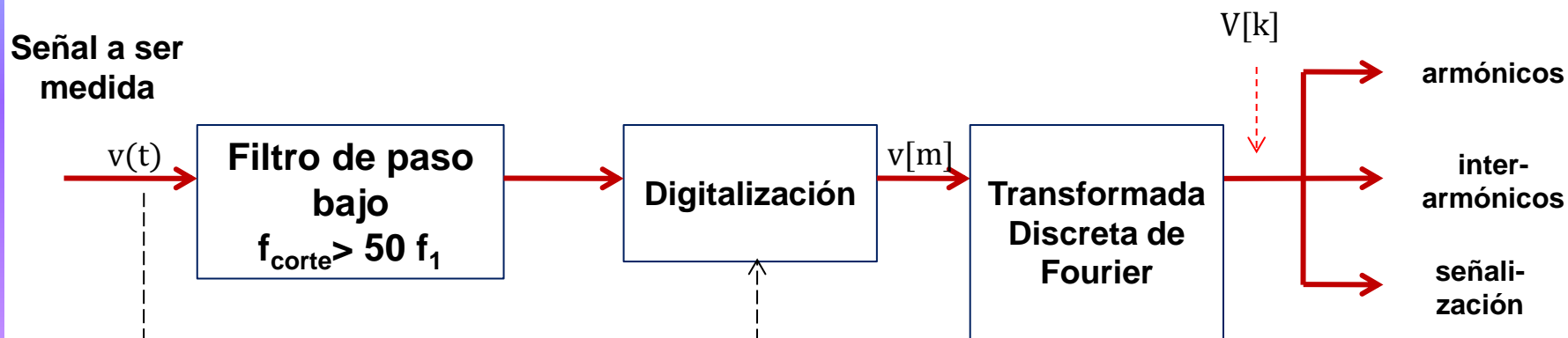
Notas:

1. Para medir los parámetros de señales en un sistema eléctrico de potencia requiere digitalizar estas señales.
2. Una vez que una señal eléctrica ha sido digitalizada, aplican las siguientes observaciones sobre la **Transformada Discreta de Fourier**:
 - **recomendada** para estudiar señales cuya frecuencia fundamental sea un sub-múltiplo entero de la frecuencia de digitalización
 - **no se recomienda** cuando la frecuencia fundamental de la señal eléctrica no es sub-múltiplo de la frecuencia de digitalización. En esos casos se utilizan otras técnicas de análisis espectral

Elementos generales de instrumentos de medición



Mediciones en el dominio de la frecuencia:



$$V[k] = 2\sqrt{a^2[k] + b^2[k]}$$

$$\phi[k] = \tan^{-1}\left(\frac{b[k]}{a[k]}\right)$$

$$a[k] = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M v[m] \text{seno}\left(2\pi k \frac{m}{M}\right)$$

$$b[k] = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M v[m] \text{coseno}\left(2\pi k \frac{m}{M}\right)$$

Análisis Espectral. IEC 61000-4-7

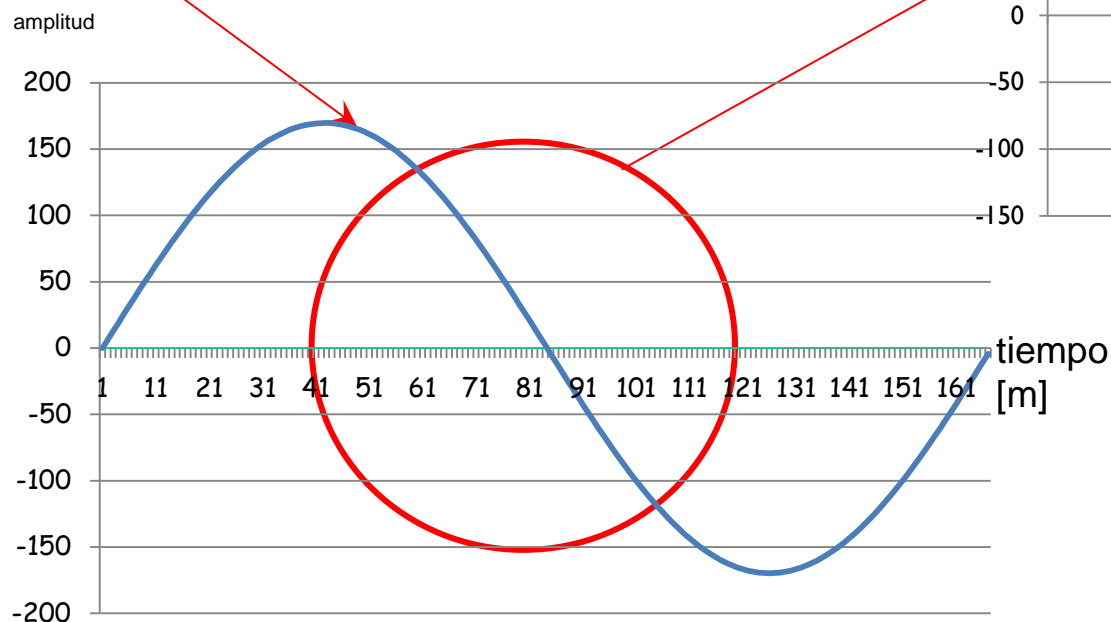
$$v(t) = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{tensión} \\ \text{eléctrica}}}{V_0} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{componente} \\ \text{de CC}}}{V_1(t)} \underbrace{\text{sen}[\phi_1(t)]}_{\substack{\text{componente de} \\ \text{frecuencia} \\ \text{fundamental}}} + \underbrace{\sum_{n=2}^M V_n(t) \text{sen}[\phi_n(t)]}_{\substack{\text{armónicos } n=2 \dots M}} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{ruido aditivo}}}{r(t)}$$

Componentes	Modelo matemático	Parámetros de calidad de la energía
Componente de CC	V_0	
Frecuencia fundamental	$V_1(t) \text{sen}[\phi_1(t)]$	<p>Amplitud $V_1(t)$</p> <p>Frecuencia $\phi_1(t) = 2\pi f_1 t + 2\pi f_1(t) + \Theta_1(t)$</p> $f_{inst}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_1(t)}{dt}$
Armónicos $n=2 \dots N$	$\sum_{n=2}^N V_n(t) \text{sen}[\phi_n(t)]$	<p>Amplitud de armónicos, inter armónicos</p> <p>Frecuencia y fase de armónicos, interarmónicos</p>
Ruido aditivo	$r_A(t)$	<p>Señalización en la red eléctrica</p> <p>Ruido electromagnético de banda ancha</p>

Digitalización/TIEMPO

Señal continua tiempo

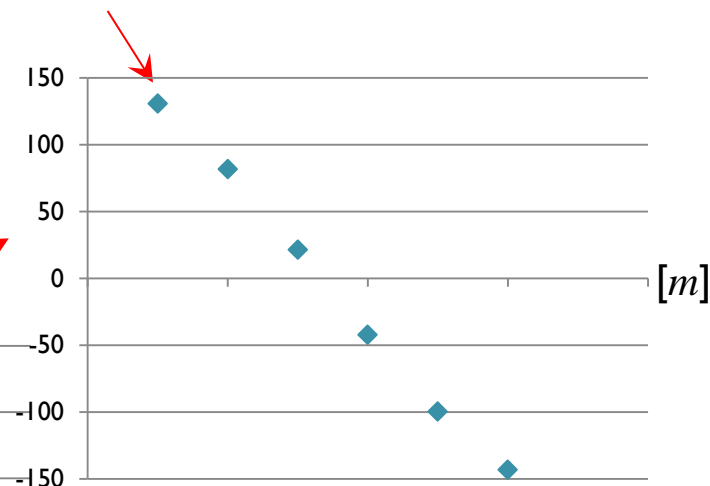
$$v(t) = V_p \text{sen}(2\pi f_1 t + \Phi)$$



$$\begin{aligned} V_p &= 120\sqrt{2} \text{ V} \\ f_1 &= 60 \text{ Hz} \\ \Phi &= 0^\circ \end{aligned}$$

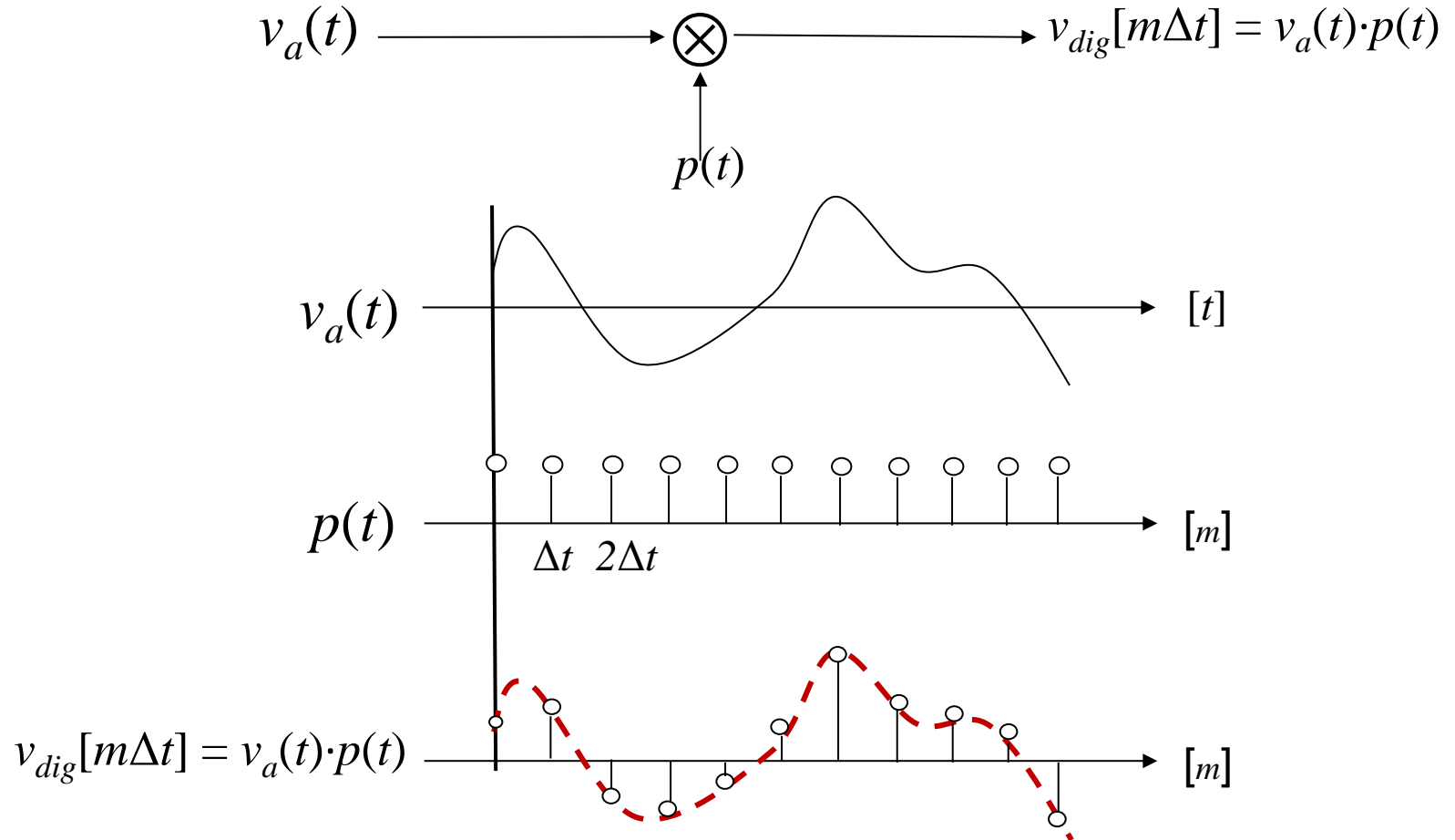
Señal digitalizada tiempo

$$v[m] = V_p \text{sen}(2\pi f_1 m + \Phi)$$



$$\begin{aligned} f_{dig} &= 1\,000 \text{ Hz} \\ \Delta t &= 1 \text{ ms} \end{aligned}$$

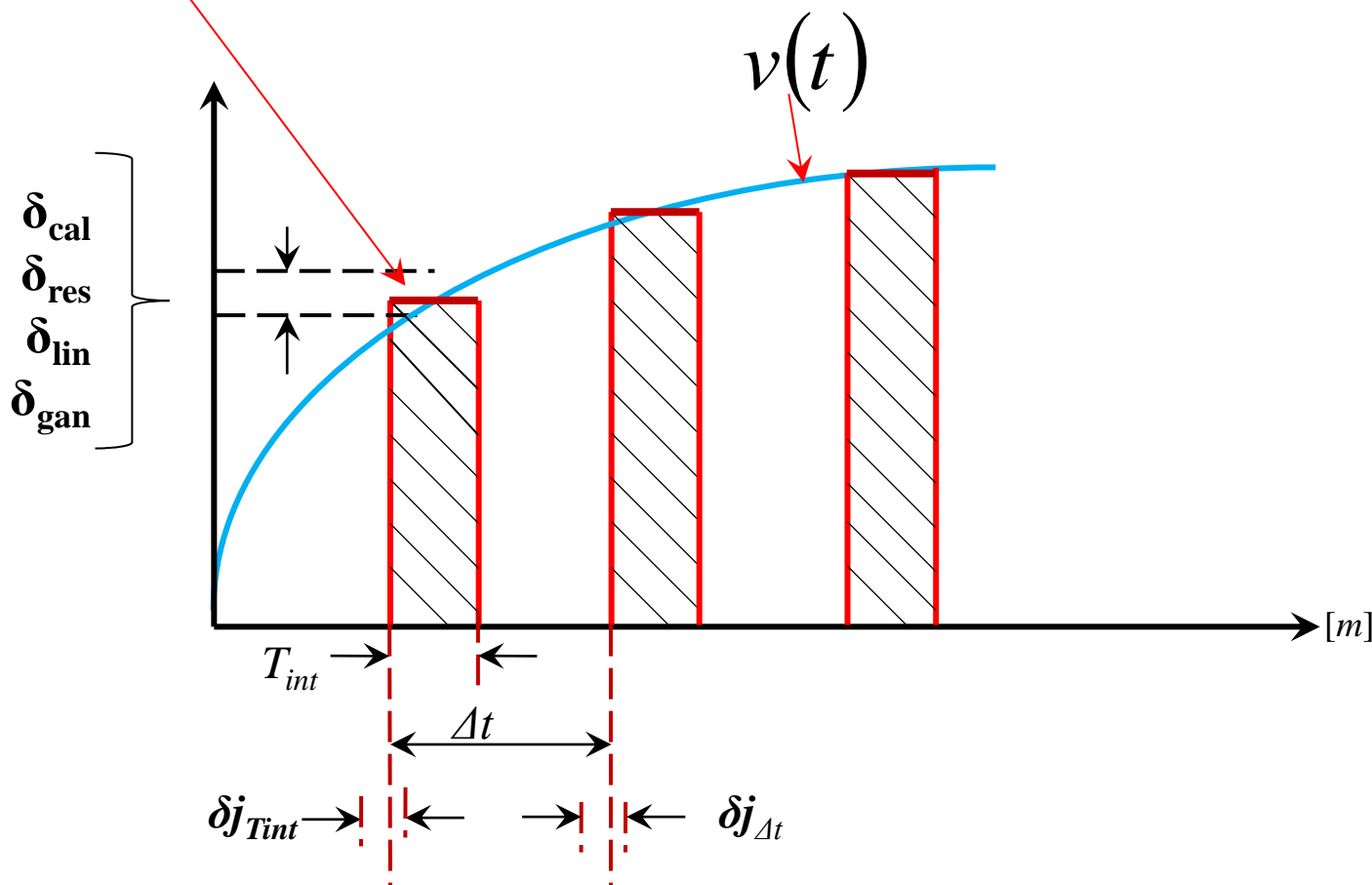
Digitalización/TIEMPO



Digitalización: multiplicación en el tiempo entre una señal de entrada $s(t)$ y una serie de impulsos de ganancia unitaria $\delta(t)$

El proceso de digitalización

$$v[m\Delta t] = \frac{V_{amplitud} AB(f)}{T_{int} + \delta j_{T_{int}}} \int_{m\Delta t + \delta j_{\Delta t}}^{m\Delta t + \delta j_{\Delta t} + T_{int} + \delta j_{T_{int}}} v(t) p(t) dt + v_{ruido}(t)$$

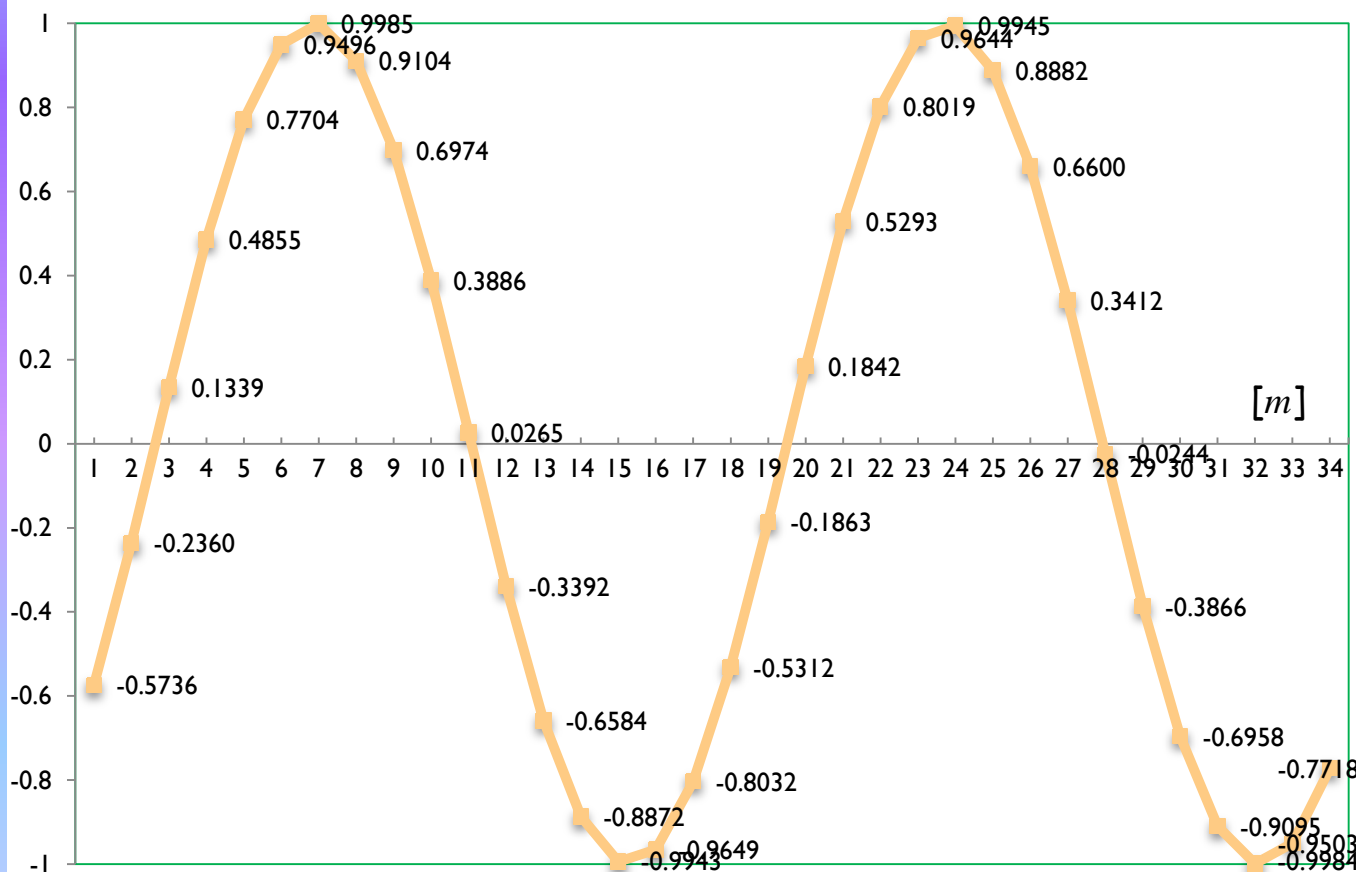


Digitalización/TIEMPO

$$v[m\Delta t] = V_1 \sin[2\pi f_1 m\Delta t + \varphi_1]$$

Ejemplo: $V_1 = 1.0$ / $f_1 = 59.3$ Hz / $\varphi_1 = -35^\circ$

$F_{\text{dig}} = 1\,000$ muestras/s $M = 1\,000$ muestras



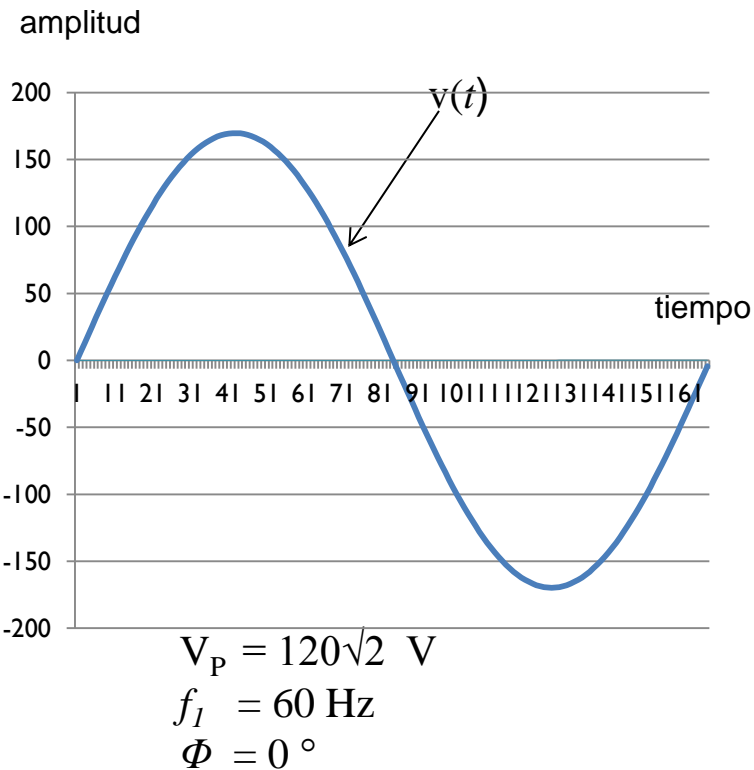
<i>m</i>	<i>v</i> [<i>m</i> Δ <i>t</i>]
1	-0.5736
2	-0.2360
3	0.1339
<i>M</i>	-0.7718

Transformada de Fourier: análisis tiempo-frecuencia

Dominio del tiempo

$$v(t) = V_P \text{sen}(2\pi f_1 t + \varphi_1)$$

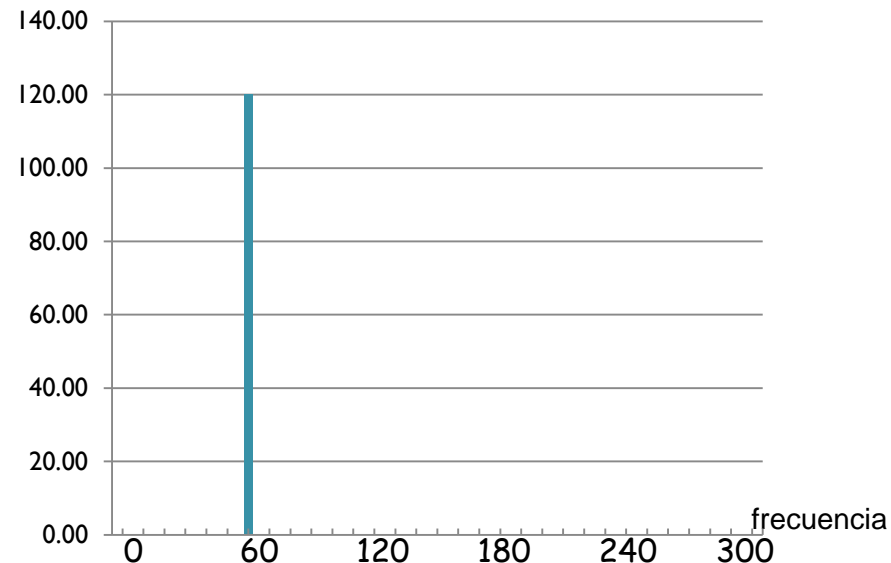
$$v[m\Delta t] = V_p \text{sen}(2\pi f_1 m\Delta t + \varphi_1)$$



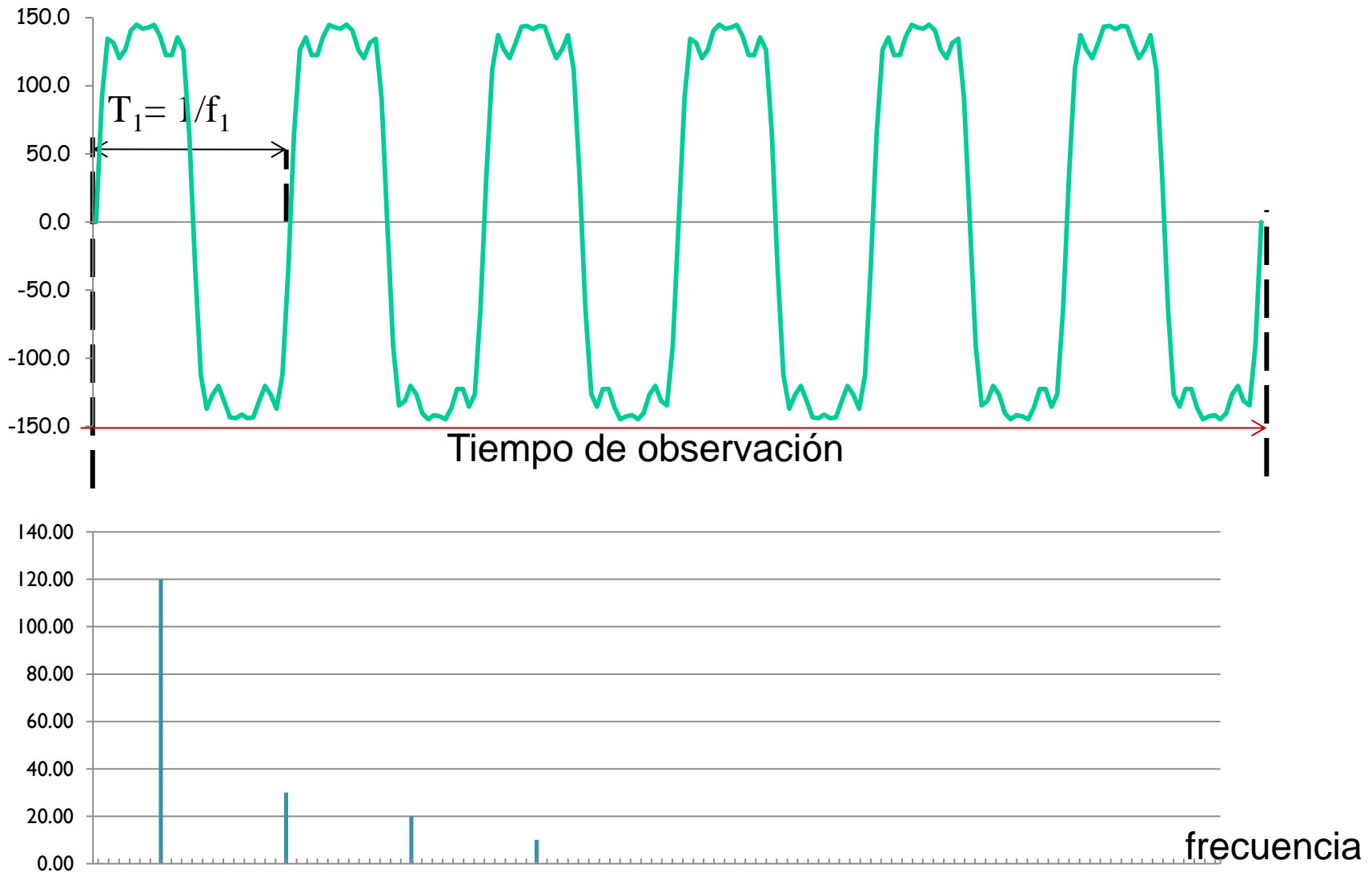
Dominio de la frecuencia

$$V(f) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) e^{-j2\pi ft} dt$$

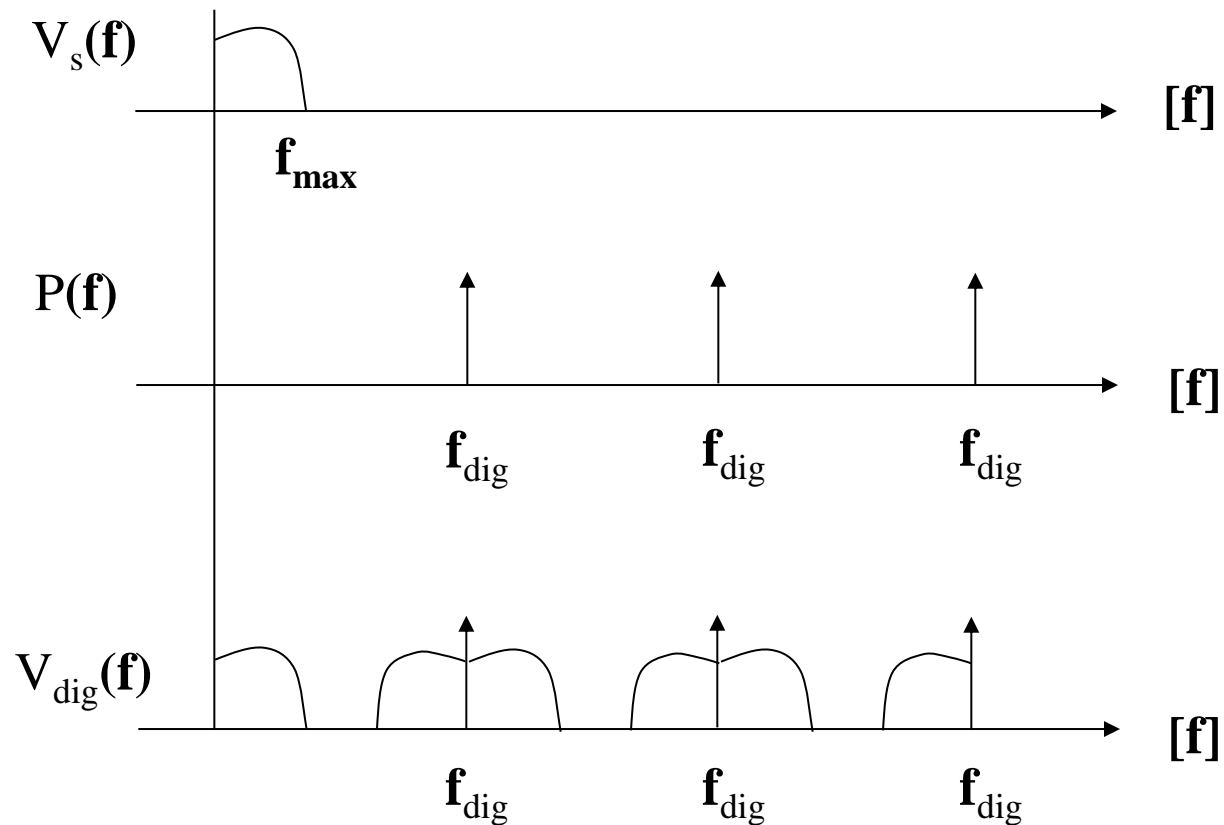
$$V[k] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} v[m\Delta t] \exp\left(-j \frac{2\pi km}{M}\right)$$



Condiciones Estacionarias: que las señales sean periódicas dentro del tiempo de observación

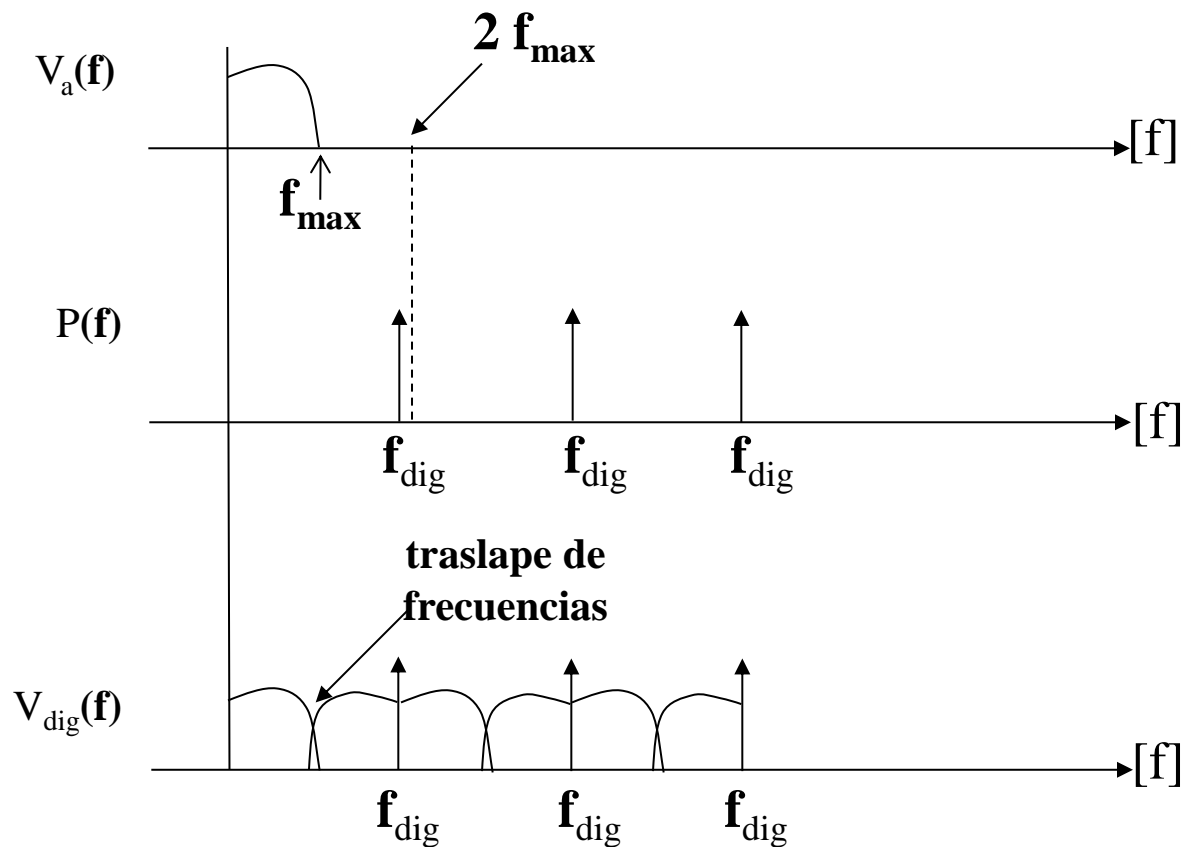


Digitalización/dominio de la FRECUENCIA



El espectro de frecuencia $P(f)$ de los pulsos unitarios $p(t)$, se repite periódicamente con la frecuencia de digitalización f_{dig} .

Teorema de Shanon: f_{dig} debe ser mayor que $2 f_{\text{max}}$



Cuando $f_{\text{dig}} \leq 2f_{\text{max}}$, el espectro de frecuencia $V_a(f)$ de la señal de entrada se repite en $f=f_{\text{dig}}$, permitiendo el paso de ruido de alta frecuencia

Análisis Espectral. IEC 61000 4 7 Condiciones de medición

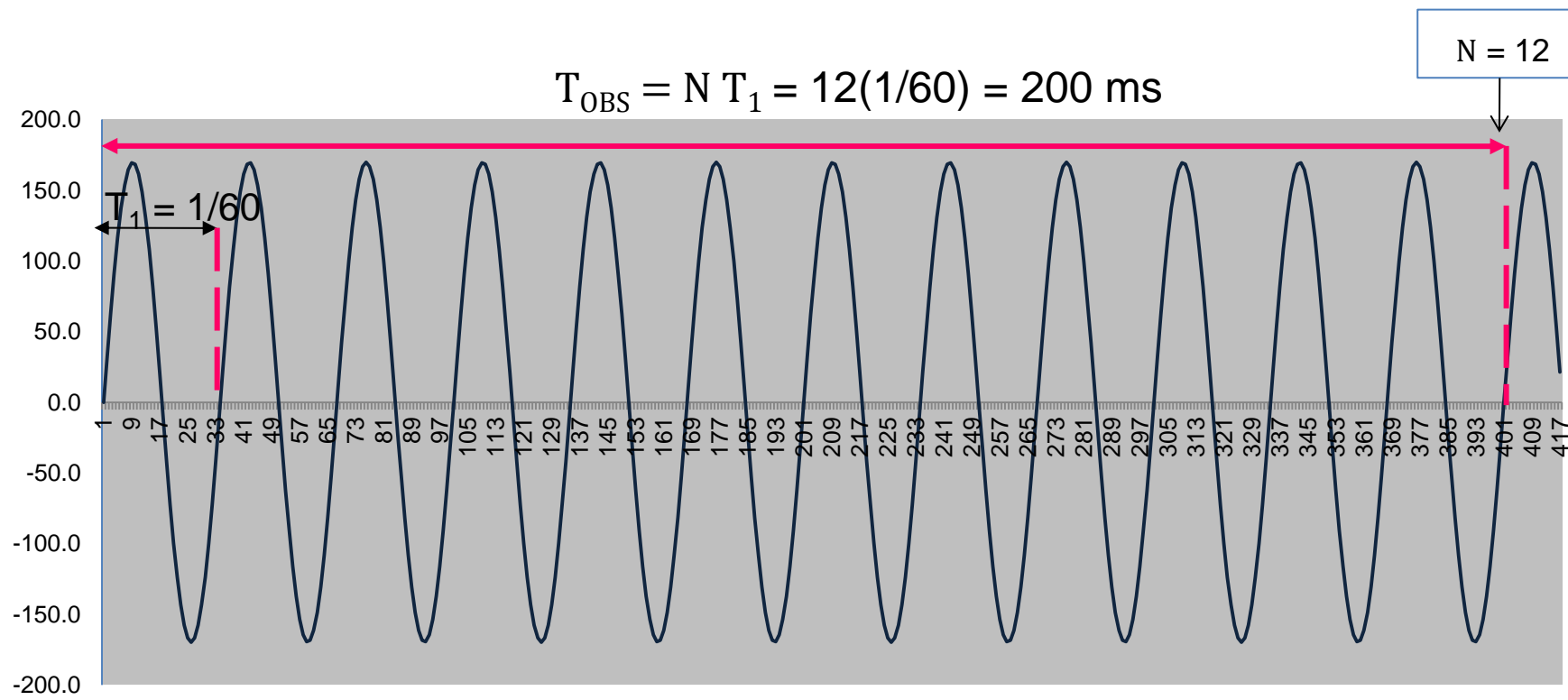
1. Tiempo de observación: $T_{OBS} = N T_1$

$N = 12$ número de ciclos de la fundamental en el tiempo de observación para $f_1 = 60$ Hz

$T_1 = 1/60$ [s] periodo de la frecuencia fundamental

2. Sincronización f_{dig} con f_1

3. Frecuencia de muestreo $f_{dig} = M / T_{OBS}$ M total de muestras



Análisis Espectral. IEC 61000 4 7

Transformada de Fourier: análisis tiempo-frecuencia

Dominio del tiempo

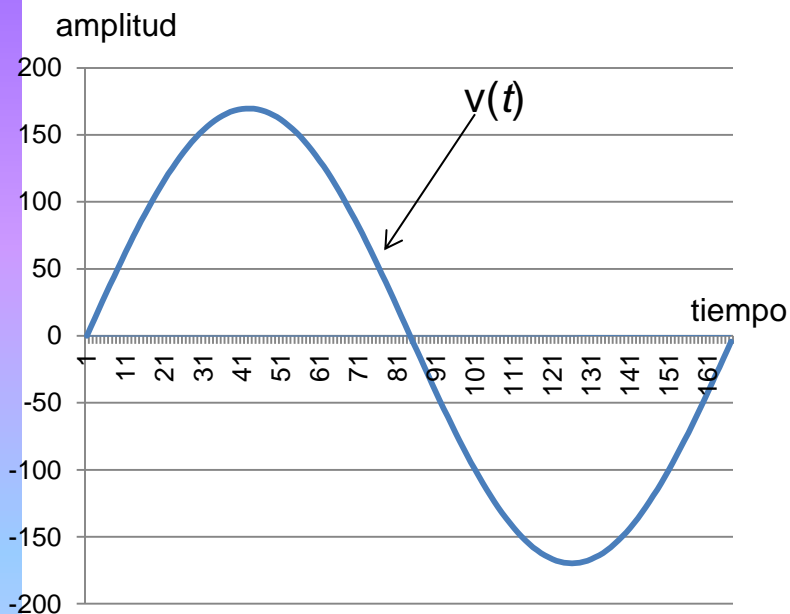
Transformada
de Fourier

Dominio de la frecuencia

$$v(t) = V_P \text{sen}(2\pi f_1 t + \Phi)$$

$$V(f) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

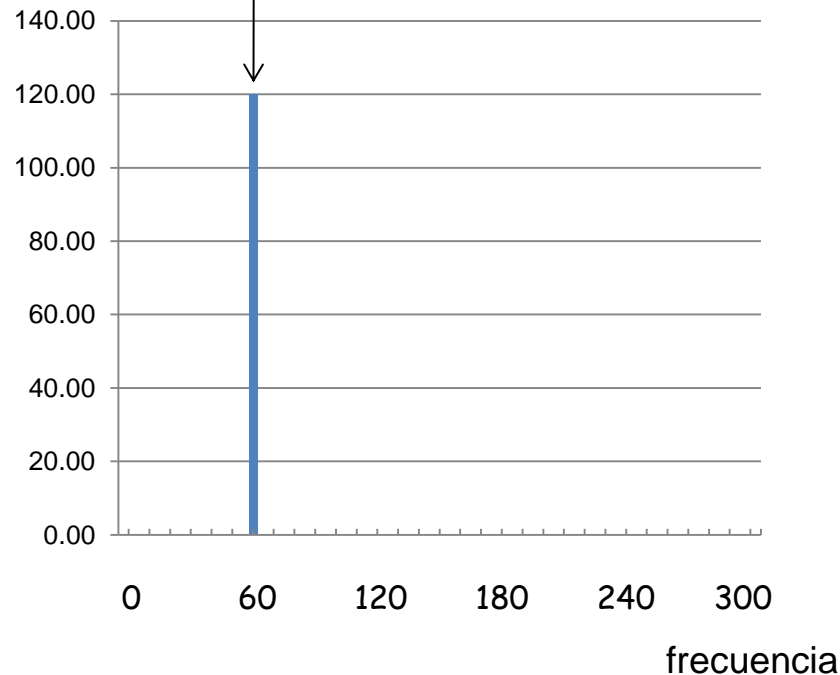
$$V(f = 60\text{Hz}) = 120\text{V}$$



$$V_P = 120\sqrt{2} \text{ V}$$

$$f_1 = 60 \text{ Hz}$$

$$\Phi = 0^\circ$$



Análisis Espectral. IEC 61000 4 7

Señal eléctrica con armónicas:

Representación de $v(t)$ mediante las Series de Fourier:

Series de Fourier para la
representación de $v(t)$

$$v(t) = c_0 + \sum_{m=1}^{\infty} c_m \text{seno} \left(2\pi \frac{mf_1}{N} t + \varphi_m \right)$$

$$c_m = |a_m + jb_m| = \sqrt{a_m^2 + b_m^2}$$

$$C_m = \frac{c_m}{\sqrt{2}}$$

$$\varphi_m = \arctan \left(\frac{a_m}{b_m} \right) \quad b_m \geq 0$$

$$\varphi_m = \pi + \arctan \left(\frac{a_m}{b_m} \right) \quad b_m < 0$$

Análisis Espectral. IEC 61000 4 7

Transformada de
Fourier de $v(t)$

$$V[k] = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M v^2[m] e^{-jkm/M}$$

$$|V[k]| = \sqrt{a^2[k] + b^2[k]}$$

$$\varphi[k] = \arctan\left(\frac{b[k]}{a[k]}\right) \quad b[k] \geq 0$$

$$\varphi[k] = \pi + \arctan\left(\frac{b[k]}{a[k]}\right) \quad b[k] < 0$$

$$a[k] = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M v[m] \cos\left(2\pi k \frac{m}{M}\right)$$

$$b[k] = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M v[m] \operatorname{sen}\left(2\pi k \frac{m}{M}\right)$$

Análisis Espectral. IEC 61000 4 7

Parámetros de la Transformada Discreta de Fourier:

$$T_{OBS} = NT_1 = 12 \left(\frac{1}{60Hz} \right) = 0.2s$$

$$M = 1000 \text{ muestras}$$

$$TDF = \frac{f_{dig}}{M} = \frac{1}{0.2s} = 5Hz$$

$$f_{dig} = \frac{M}{N/f_1} = \frac{1000}{12/60} = 5000 \text{ muestras/s}$$

Requisitos de Transformada Discreta de Fourier:

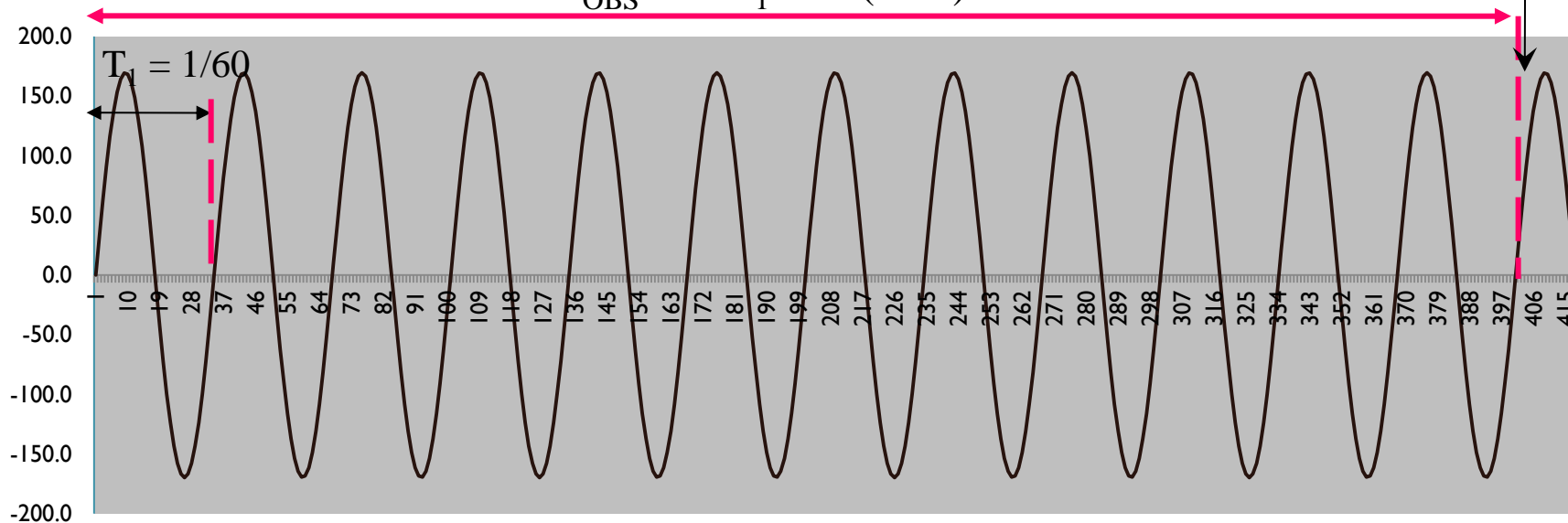
✓ T_{OBS} debe ser múltiplo entero de T_1

✓ f_{dig} debe ser múltiplo entero de f_1

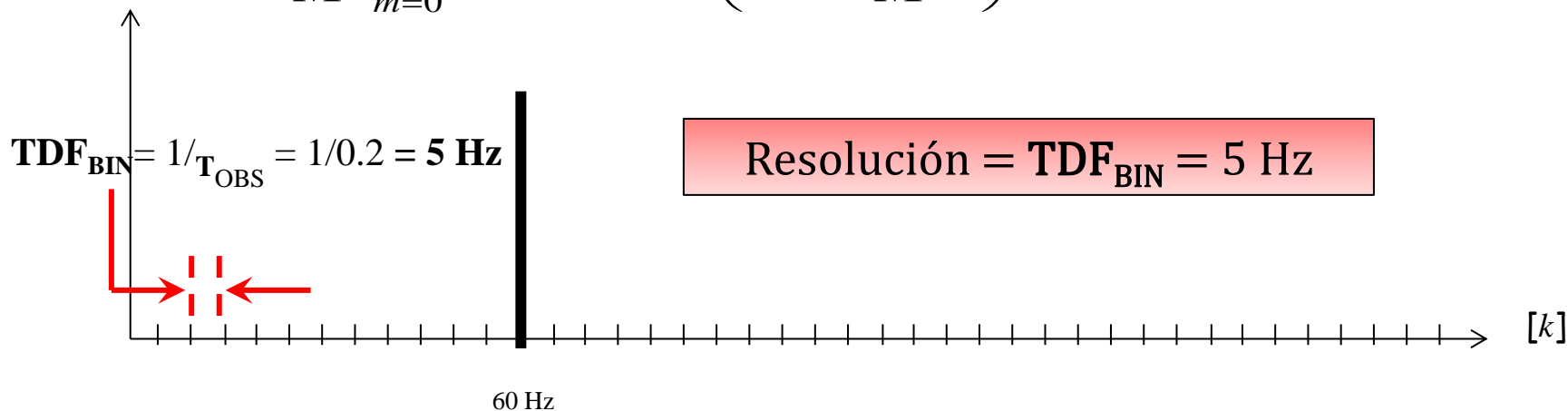
Transformada de Fourier: análisis tiempo-frecuencia

$$T_{\text{OBS}} = N T_1 = 12(1/60) = 200 \text{ ms}$$

$N = 12$



$$V[k] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} v[m\Delta t] \exp\left(-j \frac{2\pi km}{M}\right) \quad \text{para } k = 0, 1, 2, \dots, K-1$$



Análisis Espectral. IEC 61000 4 7

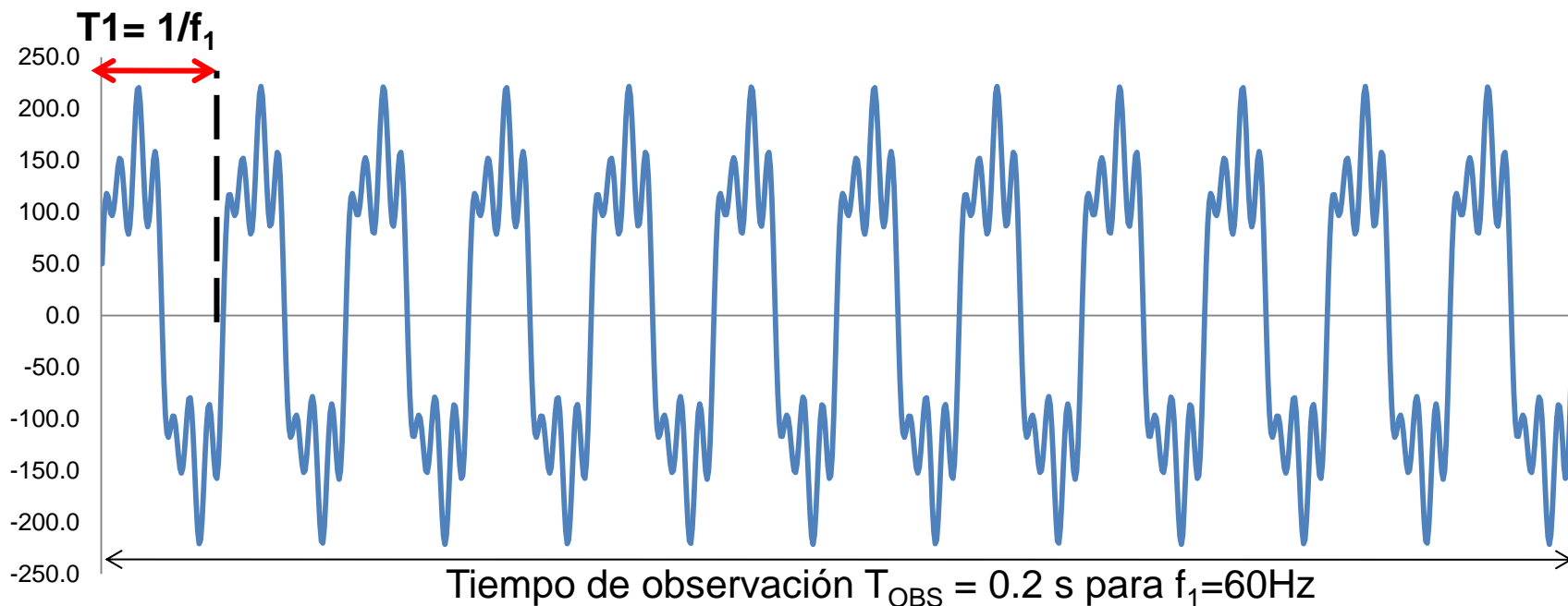
Señal $v[i]$ SINCROÑÍA entre f_1 y f_{muestreo}

Tiempo observación $T_{\text{OBS}} = NT_1 = 12(1/60) = 0.2 \text{ s}$

$N=12$ para $f_1 = 60 \text{ Hz}$

$M = 1000$ muestras

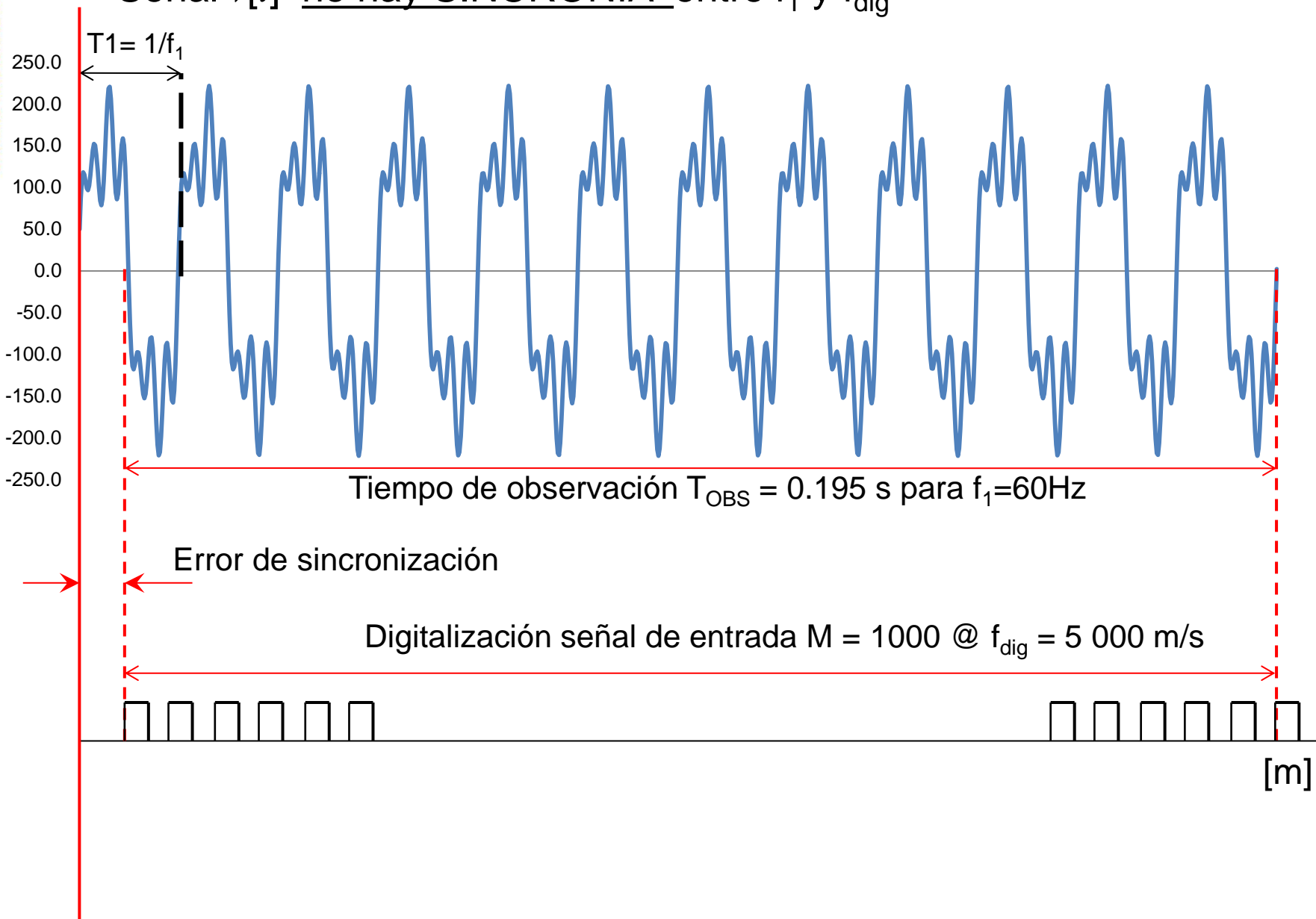
Frecuencia muestreo $f_{\text{DIG}} = M f_1 / N = 1000(60)/12 = 5000 \text{ muestras/s}$



frecuencia	60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz
amplitud	120	30	20	35
fase	0	30	-30	60

Análisis Espectral. IEC 61000 4 7

Señal $v[i]$ no hay SINCRONÍA entre f_1 y f_{dig}



$$f[m] = 1 \cdot \text{sen} \left[2\pi(50\text{Hz}) \frac{m}{M} \right]$$

$$f_1 = 50 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{dig}} = 52\,000 \text{ muestras/s}$$

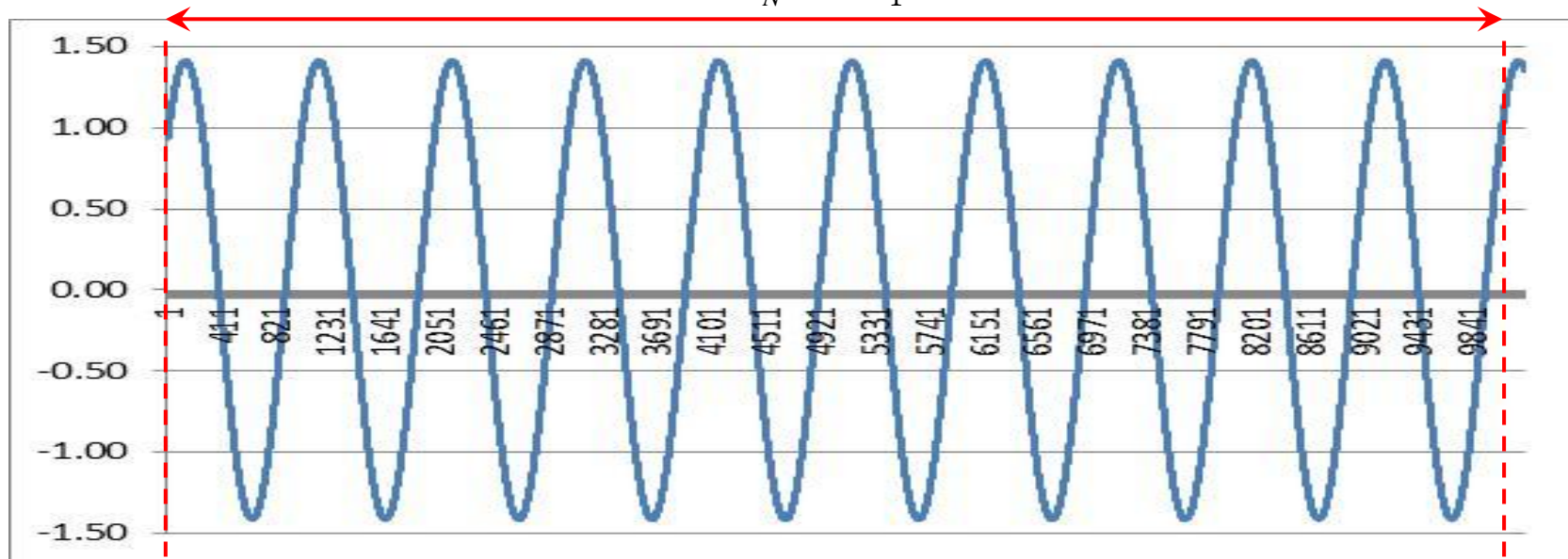
$$M = 10240 \text{ muestras}$$

$$N = 10 \text{ ciclos}$$

$$T_N = 10\,240 / 52\,000 = 0.200 \text{ s}$$

$$TDF_{\text{BIN}} = 1 / NT_1 = 5 \text{ Hz}$$

$$T_N = NT_1 = 0.2 \text{ s}$$



← Sincronización ideal →

$$M = 10240 @ f_{\text{dig}} = 52\,000 \text{ m/s}$$



Definiciones IEC 61 000-4-7

Definiciones relacionadas con armónicas

Frecuencia de armónica $f_{H,h} = h \times f_{H,1}$

frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema de potencia.

$$f_{H,h} = f_{C,k} \quad \text{con } k = h \times N$$

Orden de armónica h

relación entre armónica y la fundamental. El orden de armónica h corresponde con la componente espectral $k = h \times N$, k es el número de la componente espectral, N es el número de periodos de la fundamental dentro de la ventana de observación T_N .

Valor RCM de una componente armónica $Y_{H,h}$:

Valor RCM de una de las componentes armónicas en el análisis de formas de onda no sinusoidales. Se conoce como “armónica”.

Definiciones relacionadas con armónicas

Nota 1: la armónica $Y_{H,h}$ es idéntica con la componente espectral $Y_{C,h}$ $k=h \times N$. Esto es: $Y_{H,h} = Y_{C,h}$. El símbolo Y es reemplazado por I para corrientes o por U para tensiones.

Nota 2: en esta Norma, la ventana de tiempo $N = 12$ para 60 Hz. Esto es: $Y_{H,h} = Y_{C,12 \times h}$ para 60 Hz.

Valor RCM de un grupo de armónica $Y_{g,h}$:

Raíz cuadrada de la suma cuadrática de valores RCM de una armónica y de las componentes espectrales adyacentes a ella dentro de la ventana de tiempo. Suma el contenido de energía de la armónica con la de las componentes adjuntas.

Valor RCM de un subgrupo de armónicas $Y_{sg,h}$:

Raíz cuadrada de la suma de cuadrados de valores RCM de una armónica y las dos componentes espectrales adyacentes a ella.

Definiciones relacionadas con armónicas

Valor RCM de
armónica $Y_{H,h}$

$$Y_{H,h} = |Y_{C,k}| = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

Valor RCM de
grupo de
armónicas $Y_{g,h}$

$$Y_{g,h}^2 = \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h) - N/2}^2 + \sum_{k=(-N/2)+1}^{(N/2)-1} Y_{C,(N \times h)+k}^2 + \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h)+N/2}^2$$

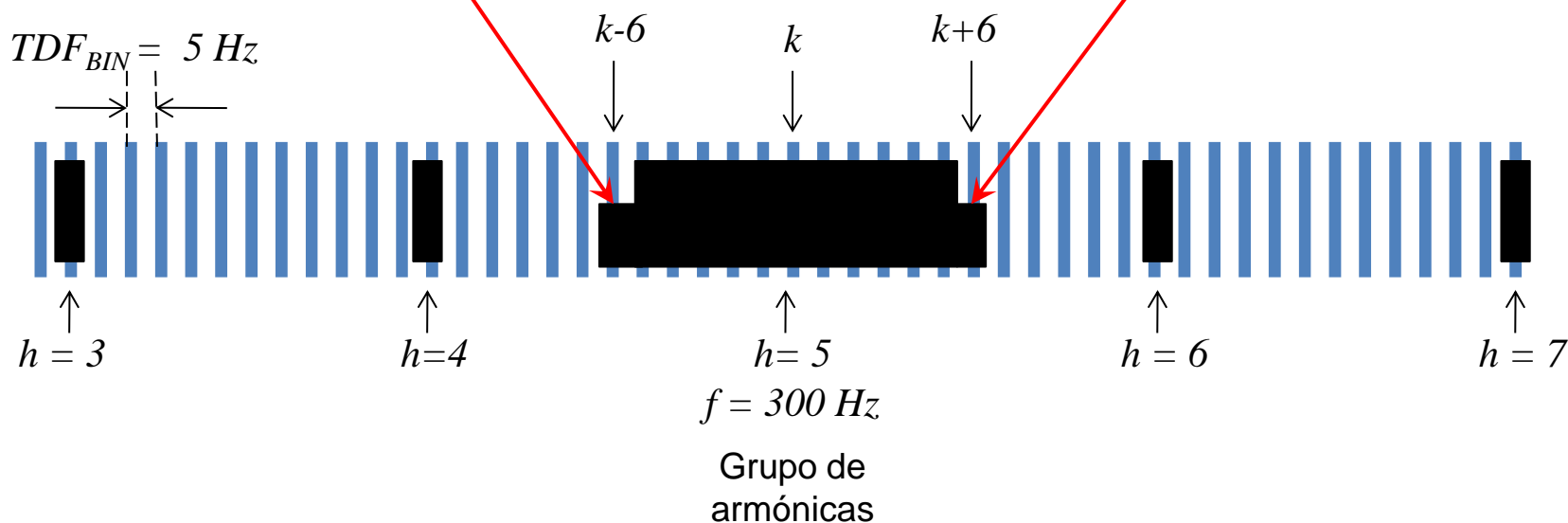
Valor RCM de sub-grupo
de armónicas $Y_{sg,h}$

$$Y_{sg,h}^2 = \sum_{k=-1}^1 Y_{C,(N \times h)+k}^2$$

Componentes adyacentes a n .
Monitoreo de fluctuaciones de
tensión

Ejemplo: RCM grupo armónicas $Y_{g,h}$ para $N = 12$, $h = 5$, $f_1 = 60$ Hz

$$Y_{g,h=5}^2 = \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h=5) - N/2}^2 + \sum_{k=(-N/2)+1}^{(N/2)-1} Y_{C,(N \times h=5)+k}^2 + \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h=5)+N/2}^2$$



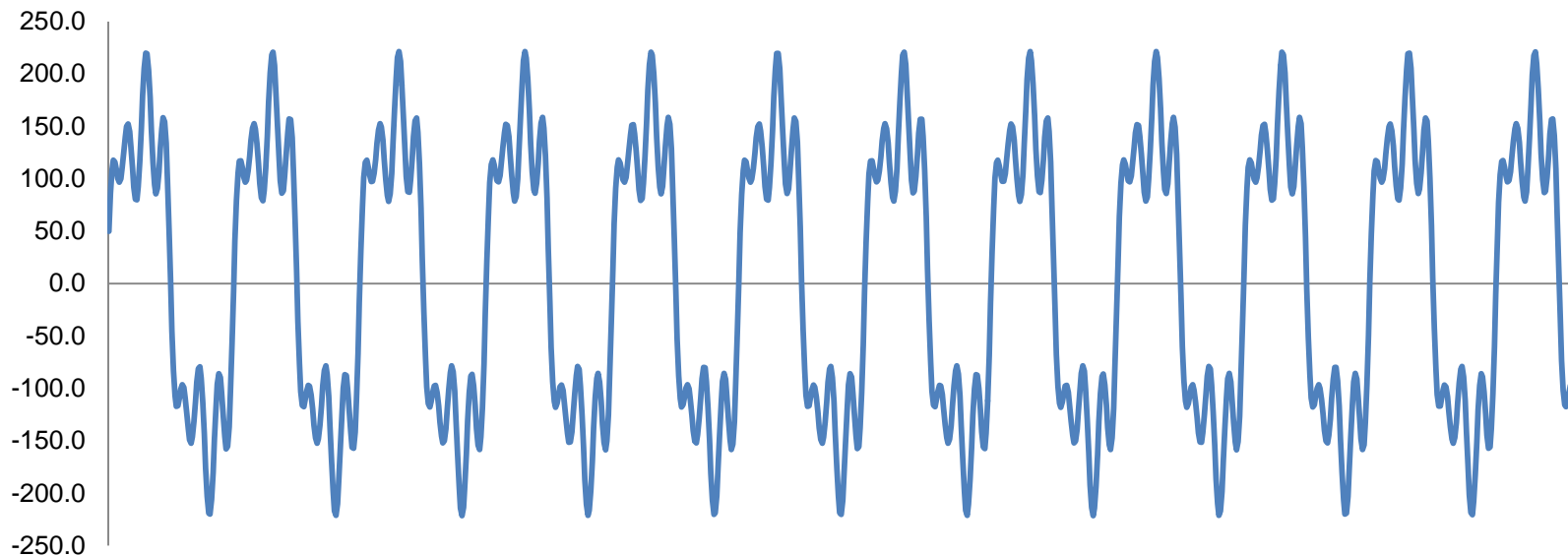
Componentes adyacentes a la ***h-armónica***.

La Transformada de Fourier asume que la señal a analizar es estacionaria. Cuando la señal fluctúa en amplitud, la T. de Fourier reporta componentes de frecuencia adyacentes a las frecuencias inter-armónicas.

Aplicación: monitoreo de fluctuaciones de tensión durante levantamiento de estadísticos de un sistema de potencia

Ejemplo: RCM grupo armónicas $Y_{g,h}$ para $N = 12$, $h = 5$, $f_1 = 60$ Hz

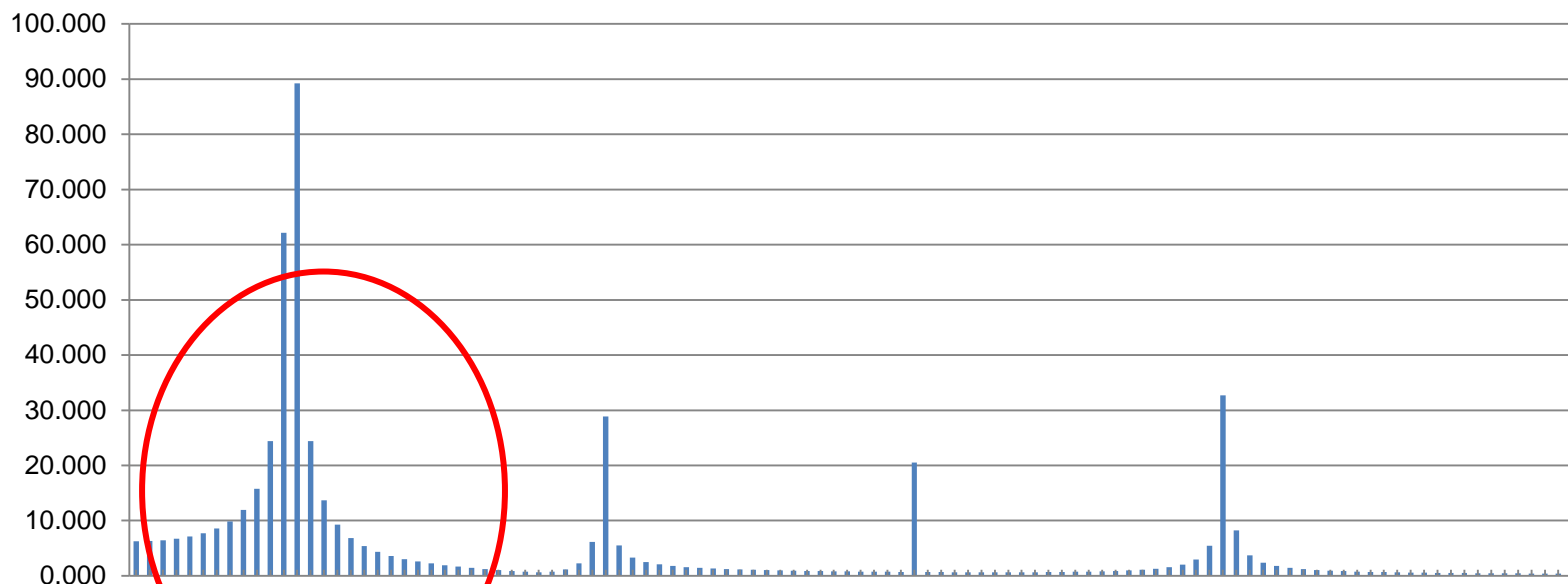
$$Y_{g,h=5}^2 = \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h=5)-N/2}^2 + \sum_{k=(-N/2)+1}^{(N/2)-1} Y_{C,(N \times h=5)+k}^2 + \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h=5)+N/2}^2$$



V_{PICO}	169.7	42.4	28.3	49.5
frecuencia	58	174	290	406
fase	0	30	-30	60
Número de ciclos	12			
T_{obs}	0.2 s			
TDF_{BIN}	5			
número de muestras	1000			
frecuencia muestreo	5000			

Ejemplo: RCM grupo armónicas $Y_{g,h}$ para $N = 12$, $h = 5$, $f_1 = 60$ Hz

$$Y_{g,h=5}^2 = \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h=5) - N/2}^2 + \sum_{k=(-N/2)+1}^{(N/2)-1} Y_{C,(N \times h=5)+k}^2 + \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h=5)+N/2}^2$$



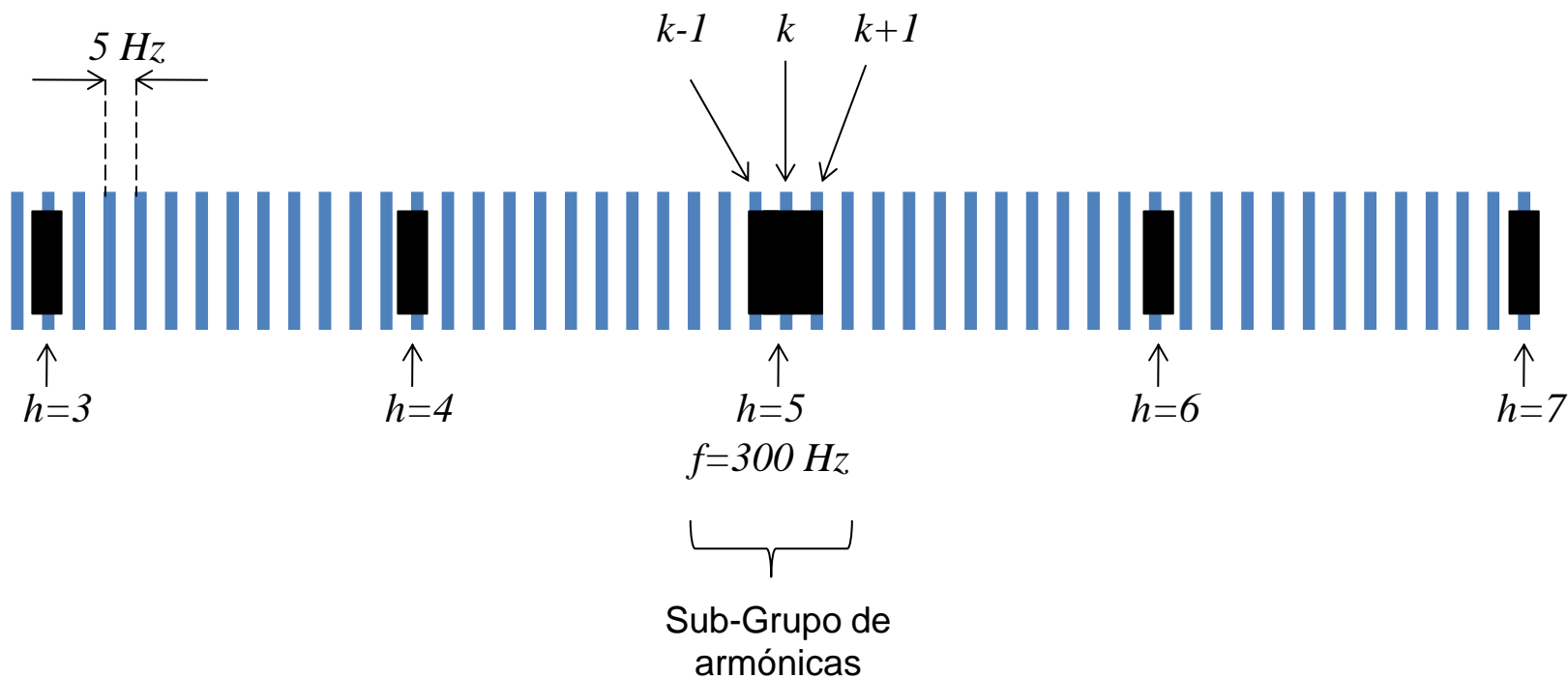
Fuga espectral en TDF debido a falta de sincronía entre f_1 y f_{muestreo}

$Y_{C,1}$	117.93 V_{RMS}
$Y_{C,3}$	30.60 V_{RMS}
$Y_{C,5}$	20.63 V_{RMS}
$Y_{C,7}$	34.74 V_{RMS}

Ejemplo: RCM grupo armónicas $Y_{g,h}$ para $N = 12$, $h = 5$, $f_1 = 60$ Hz

Valor RCM de sub-grupo armónicas $Y_{sg,h}$

$$Y_{sg,h=5}^2 = \sum_{k=-1}^{k=1} Y_{C,(N \times h=5)+k}^2$$



Definiciones relacionadas con Distorsión Armónica

Distorsión armónica total: ***THD*** relación entre el valor RCM de la suma de todas las componentes ($Y_{H,h}$) hasta un orden específico (h_{\max}) y el valor RCM de la fundamental ($Y_{H,1}$)

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} \left(\frac{Y_{H,h}}{Y_{H,1}} \right)^2}$$

Distorsión armónica total de grupo: ***THDG*** relación de RCM de los grupos de armónicas ($Y_{g,h}$) y el RCM del grupo asociado con el grupo de la fundamental ($Y_{g,1}$), donde $h_{\min} \geq 2$

$$THDG = \sqrt{\sum_{h=h_{\min}}^{h_{\max}} \left(\frac{Y_{g,h}}{Y_{g,1}} \right)^2}$$

$$h_{\min} \geq 2$$

Definiciones relacionadas con Distorsión Armónica

Distorsión armónica total Sub-Grupo: ***THDS_y*** relación de RCM de los sub-grupos de armónicas ($Y_{sg,h}$) entre el RCM del subgrupo asociado con la fundamental ($Y_{sg,1}$)

$$THDS_y = \sqrt{\sum_{h=h_{\min}}^{h_{\max}} \left(\frac{Y_{sg,h}}{Y_{sg,1}} \right)^2}$$

$$h_{\min} \geq 2$$

Distorsión armónica parcial ponderada: ***PWHD_{H,Y}*** relación de RCM, pesado con el orden armónico h , de un grupo selecto de armónicas de orden mayor (desde el orden h_{\min} hasta el orden h_{\max}) y el RCM de la fundamental.

$$PWHD_{H,Y} = \sqrt{\sum_{h=h_{\min}}^{h_{\max}} h \left(\frac{Y_{H,h}}{Y_{H,1}} \right)^2}$$

$$h_{\min} \geq 2$$

Medición de inter-armónicas

Naturaleza de las inter-armónicas

- las inter-armónicas varían en amplitud y fase respecto de la componente fundamental, u otras componentes armónicas.
- las componentes espectrales entre dos armónicas consecutivas forman un **grupo de inter-armónicas**
- la señal eléctrica presenta variaciones de amplitud y/o fase de sus componentes de frecuencia, las cuales exceden al periodo de observación
- electrónica de potencia por switcheo, con frecuencia no sincronizada con la frecuencia del suministro eléctrico (fuentes AC-DC; DC-DC)

Agrupamiento de inter-armónicas:

El agrupamiento proporciona un valor total de las componentes espectrales entre dos armónicas, lo cual incluye el efecto de fluctuaciones de las componentes armónicas. La siguiente ecuación, dependiente de la frecuencia del suministro eléctrico, permite el cálculo del valor de un grupo de interarmónicas:

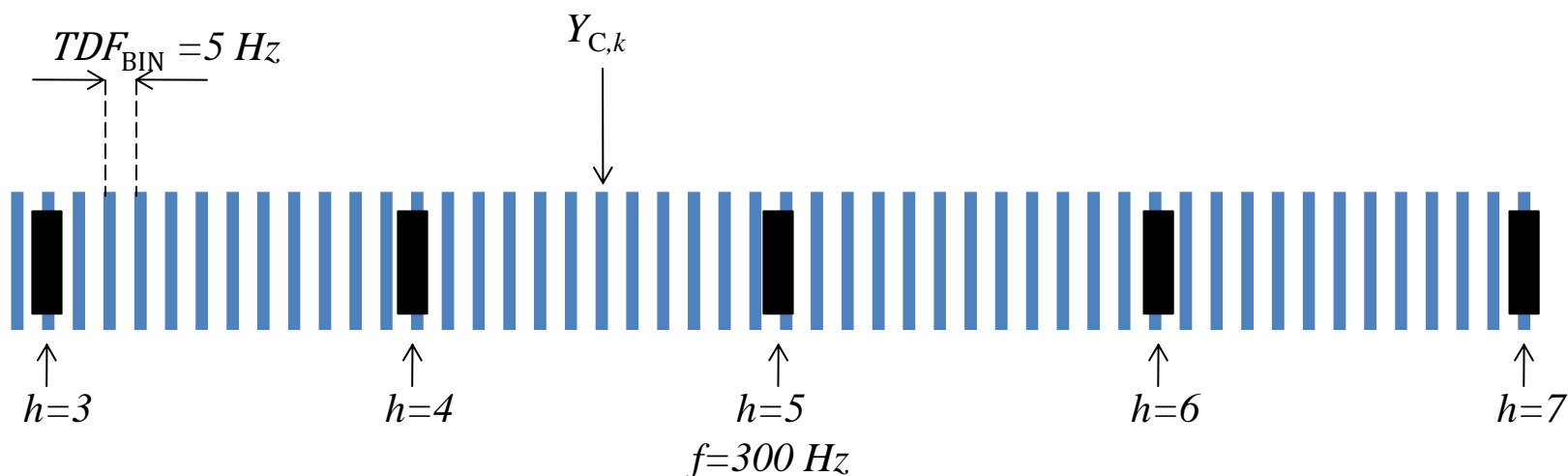
$$Y_{ig,h}^2 = \sum_{k=1}^{N-1} Y_{C,(N \times h) + k}^2$$

Nota: el índice ig,h es el grupo de inter-armónicas de orden h . En esta norma, el RCM del grupo de inter armónicas entre los ordenes h y $h+1$ se designa como $Y_{ig,h}$. Por ejemplo, el grupo entre $h = 5$ y $h = 6$ se designa como $Y_{ig,5}$

Definiciones relacionadas con interarmónicas

Valor RCM de una componente espectral $Y_{C,k} = \sqrt{a^2[k] + b^2[k]}$

Es el valor RCM de una componente cuya frecuencia es un múltiplo del inverso de la duración de la ventana de tiempo $k = TDF_{\text{BIN}}$



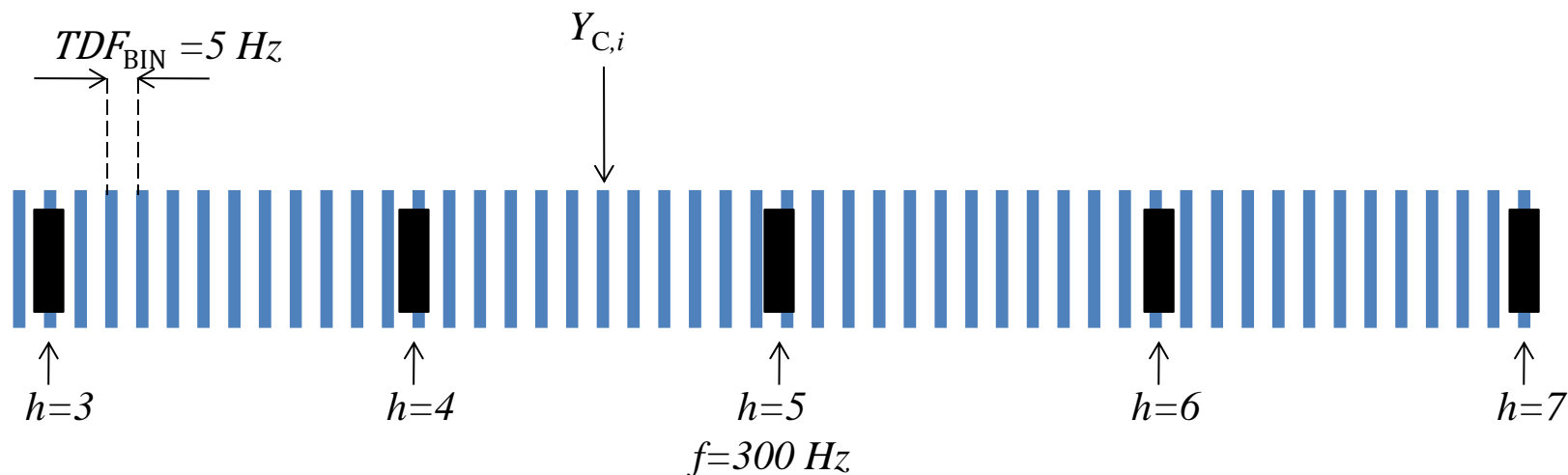
NOTA 1: si la duración de la ventana de tiempo es un múltiplo del periodo fundamental, solo algunos de los componentes espectrales tiene frecuencias que son enteros múltiplos de la frecuencia fundamental.

NOTA 2: el intervalo de frecuencia entre dos componentes espectrales consecutivos es la inversa del ancho de la ventana de tiempo, aproximadamente 5 Hz según esta Norma

Definiciones relacionadas con interarmónicas

Valor RCM de una componente interarmónica $Y_{C,i}$:

Valor RCM de una componente espectral, $Y_{C,k} \neq h \times N$, con una frecuencia entre dos frecuencias armónicas consecutivas.



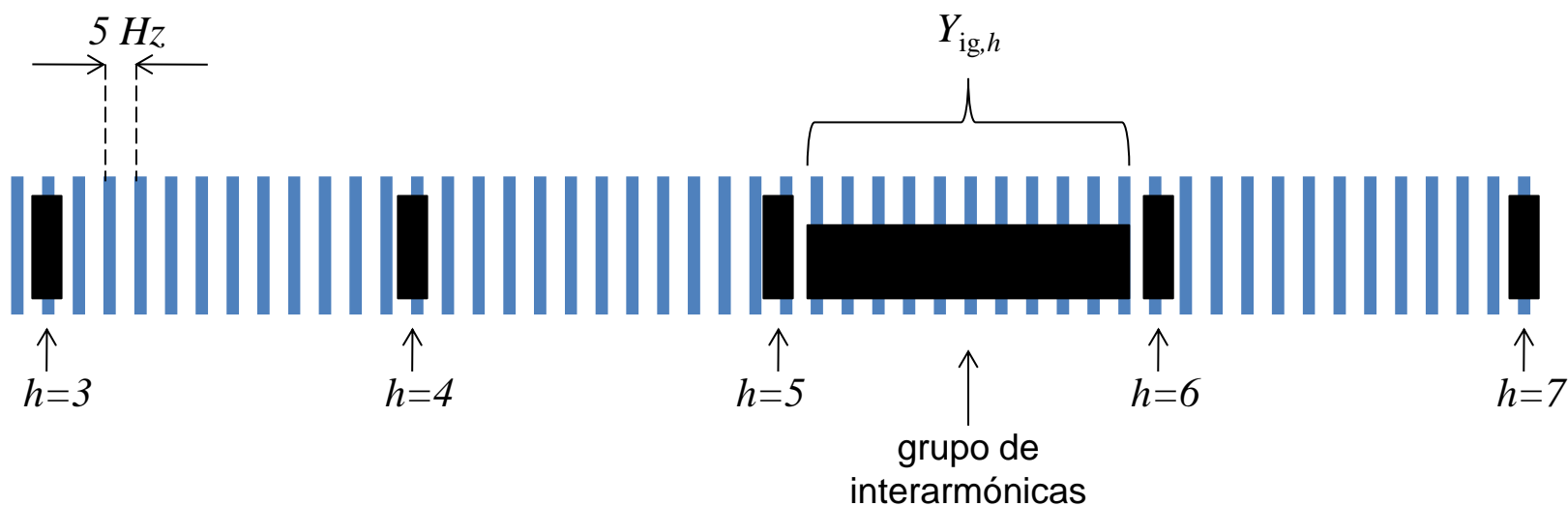
NOTA 1: la frecuencia de la componente interarmónica está dada por la frecuencia de la línea espectral. Esta frecuencia no es múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

NOTA 2: se hace una distinción entre una “componente interarmónica” producida como una componente física por un equipo, por ejemplo a 183.333 Hz, y una “componente espectral” calculada por el instrumento como resultado del análisis de la forma de onda, por ejemplo; para un sistema de 50 Hz, una frecuencia de 185 Hz (la frecuencia del TDF_{BIN}). La “componente espectral” también es la “componente armónica” para $h \times N$, donde h es un entero.

Definiciones relacionadas con interarmónicas

Valor RCM de un grupo de interarmónicas $Y_{ig,h}$:

Raíz cuadrada de la suma cuadrática de valores RCM de todos los componentes espectrales en el intervalo entre dos frecuencias armónicas consecutivas.



NOTA 1: El valor RCM del grupo de interarmónicas entre ordenes de armónicas h y $h+1$ es designada como $Y_{ig,h}$. Por ejemplo el grupo entre $h = 5$ y $h = 6$ es designado $Y_{ig,5}$.

Definiciones relacionadas con interarmónicas

Frecuencia de grupo de interarmónicas $f_{ig,h}$

La media de las dos frecuencias armónicas entre las cuales está situado el grupo. Por ejemplo, $f_{ig,h} = (f_{H,h} + f_{H,h+1})/2$

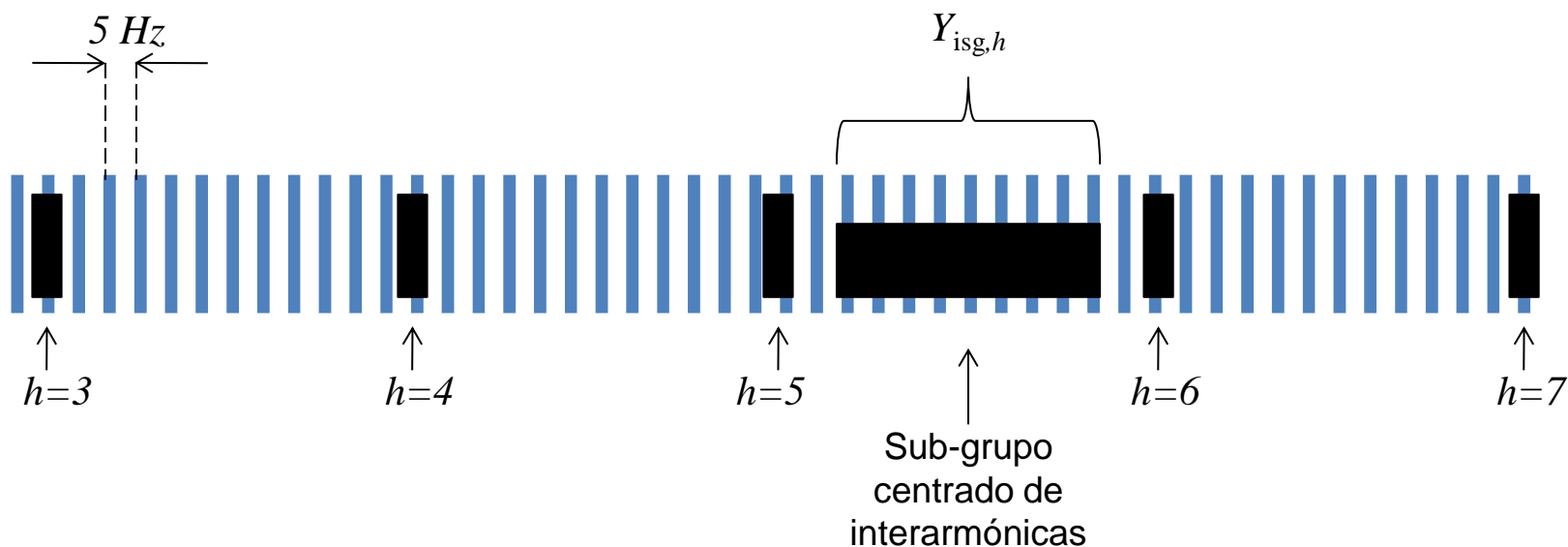
Frecuencia de subgrupo centrado de interarmónicas $f_{isg,h}$

La media de las dos frecuencias armónicas entre las cuales está situado el subgrupo. Por ejemplo, $f_{isg,h} = (f_{H,h} + f_{H,h+1})/2$

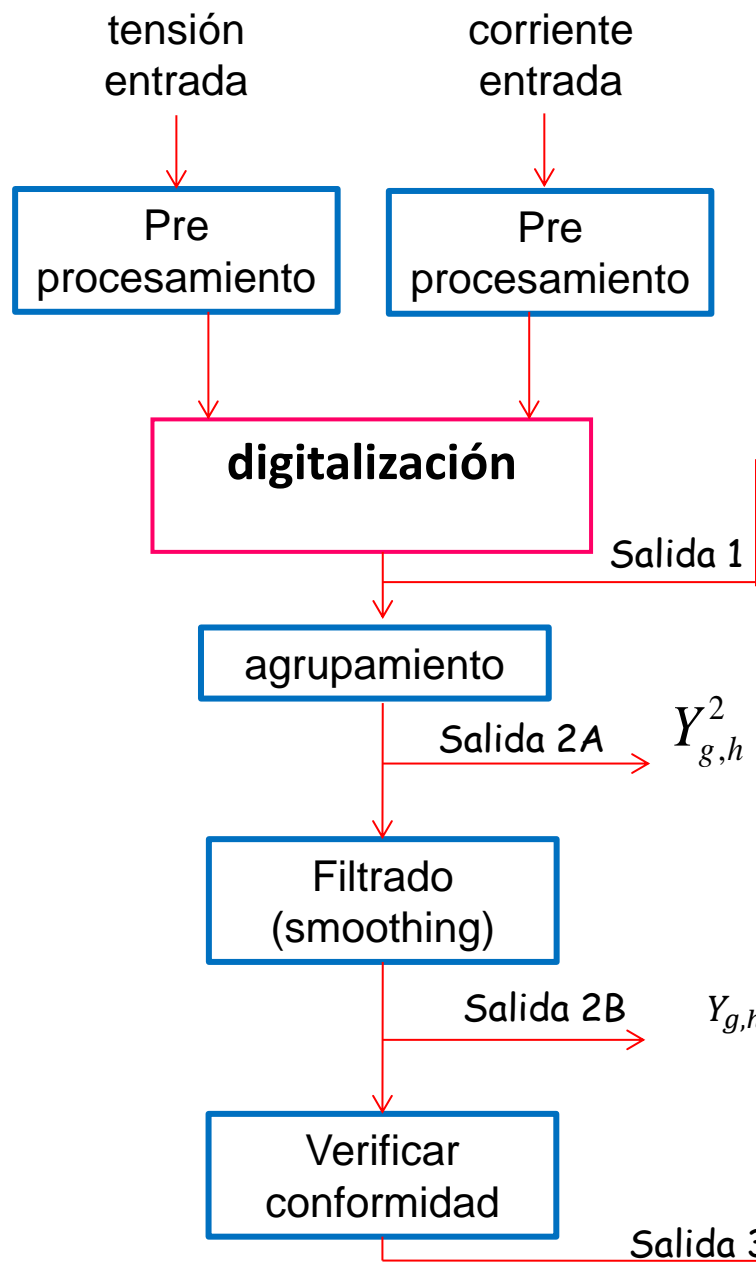
Definiciones relacionadas con interarmónicas

Valor RCM de sub-grupo centrado de interarmónicas $Y_{\text{isg},h}$

Valor RCM de todas las componentes espectrales en el intervalo entre dos armónicas consecutivas, excluyendo componentes espectrales adyacentes directamente a las frecuencias armónicas.



Métodos de medición en el dominio de la frecuencia

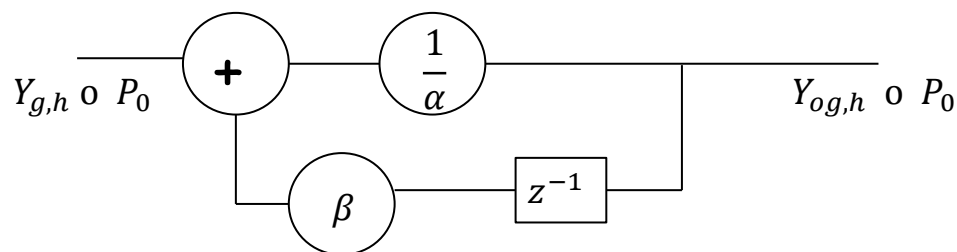


$$V[k] = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M v^2[m] e^{-\frac{jkm}{M}}$$

$$|V[k]| = \sqrt{a^2[k] + b^2[k]}$$

$$\varphi[k] = \arctan\left(\frac{b[k]}{a[k]}\right)$$

$$Y_{g,h}^2 = \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h) - N/2}^2 + \sum_{k=(-N/2)+1}^{(N/2)-1} Y_{C,(N \times h) + k}^2 + \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h) + N/2}^2$$



Agrupamiento de armónicos

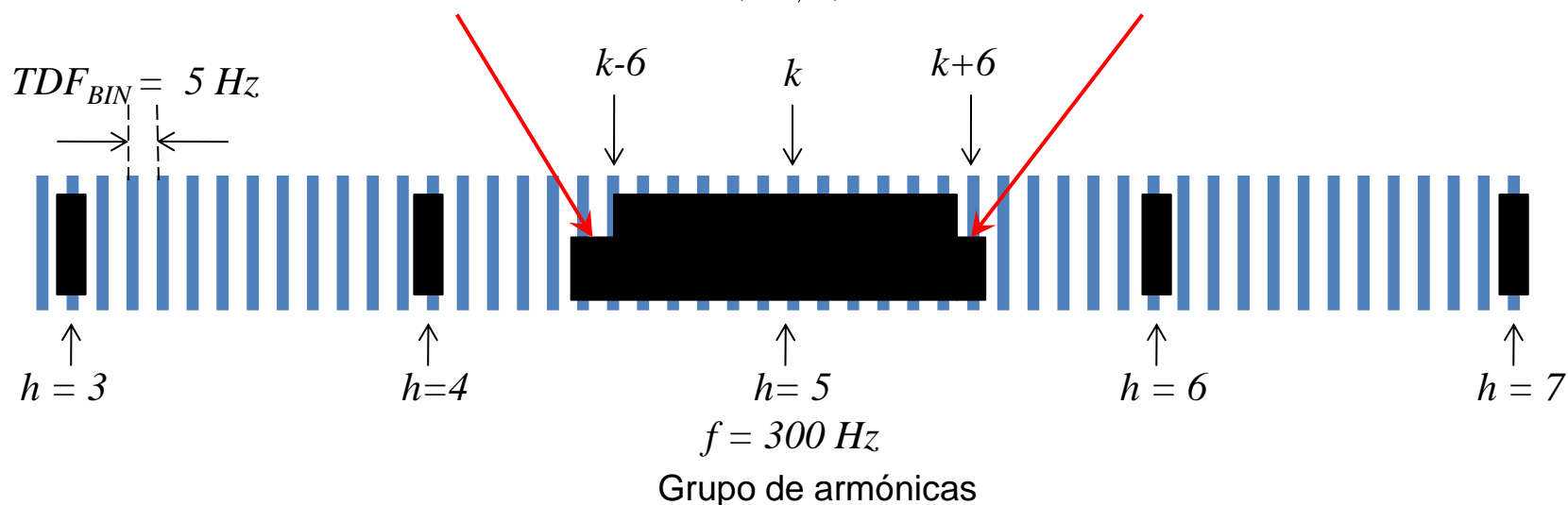
En salida 1 (figura anterior), se agrupan los valores RCM de las componentes espectrales entre dos armónicas adyacentes de acuerdo a:

$$Y_{g,h}^2 = \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h) - N/2}^2 + \sum_{k=(-N/2)+1}^{(N/2)-1} Y_{C,(N \times h)+k}^2 + \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h)+N/2}^2$$

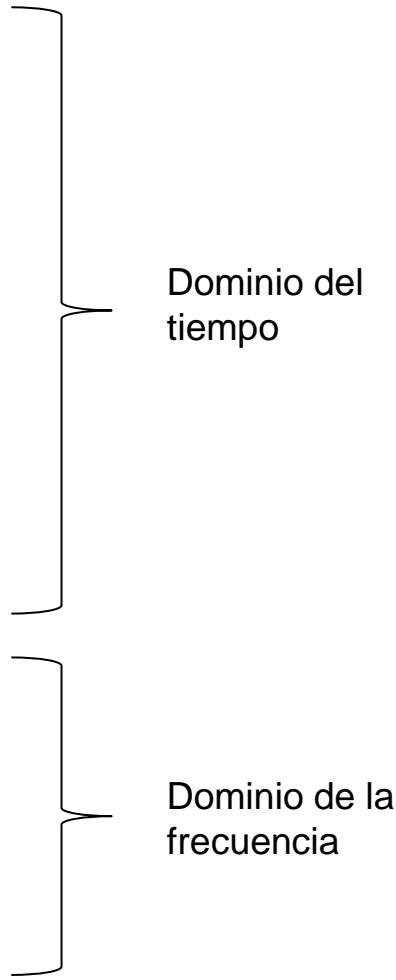
- Deben usarse solo componentes intermedios arriba de la segunda armónica.
- El grupo resultante de armónicas de orden h , que corresponde a la armónica central del grupo, tiene una magnitud $Y_{g,h}$.
- En la ecuación anterior $Y_{C,(N \times h)+k}$ es el valor RCM de la componente espectral correspondiente a un DTFBIN, y $(N \times h)+k$ es el orden de las componentes espectrales, y $Y_{g,h}$ es el RCM del grupo de armónicas.

Ejemplo: RCM grupo armónicas $Y_{g,h}$ para $N = 12$, $h = 5$, $f_1 = 60$ Hz

$$Y_{g,h=5}^2 = \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h=5) - N/2}^2 + \sum_{k=(-N/2)+1}^{(N/2)-1} Y_{C,(N \times h=5)+k}^2 + \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h=5)+N/2}^2$$



5. Métodos de medición de parámetros de calidad de la energía eléctrica

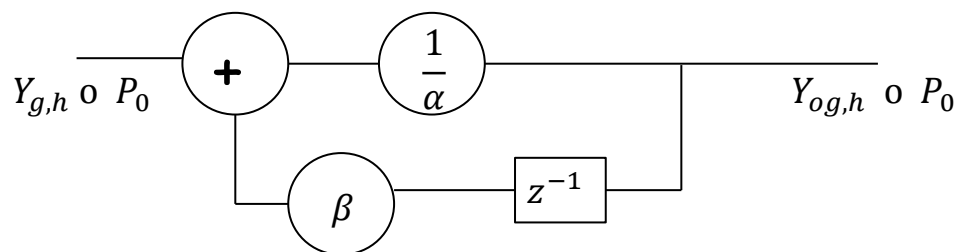
1. Frecuencia del suministro
 2. Amplitud de la tensión del suministro
 3. Dip y Swell en la tensión del suministro
 4. Interrupciones de tensión
 5. Tensiones transitorias
 6. Desbalance del suministro
 7. Armónicas de tensión
 8. Interarmónicas de tensión
 9. Tensión de señalización en el suministro
 10. Cambios rápidos de tensión
 11. Sobre y baja desviación
- 
- Dominio del tiempo
- Dominio de la frecuencia

Filtrado (smoothing) de armónicos

- Debe realizarse un filtrado sobre el valor RCM $Y_{g,h}$ de cada armónica de acuerdo a:

$$Y_{g,h}^2 = \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h) - N/2}^2 + \sum_{k=(-N/2)+1}^{(N/2)-1} Y_{C,(N \times h)+k}^2 + \frac{1}{2} Y_{C,(N \times h)+N/2}^2$$

- Debe usarse un filtro digital de paso bajo de primer orden con una constante de tiempo de 1.5 s.



- Los coeficientes del filtro se ajustan al ancho de la ventana de tiempo según la siguiente tabla

Frecuencia	Ciclos en la ventana	Frecuencia digitalización (del filtro de paso bajo) [ms]	α	β
50	10	$\approx 1/200$	8.012	7.012
60	12	$\approx 1/200$	8.012	7.012
50	16	$\approx 1/320$	5.206	4.206
60	16	$\approx 1/267$	6.14	5.14

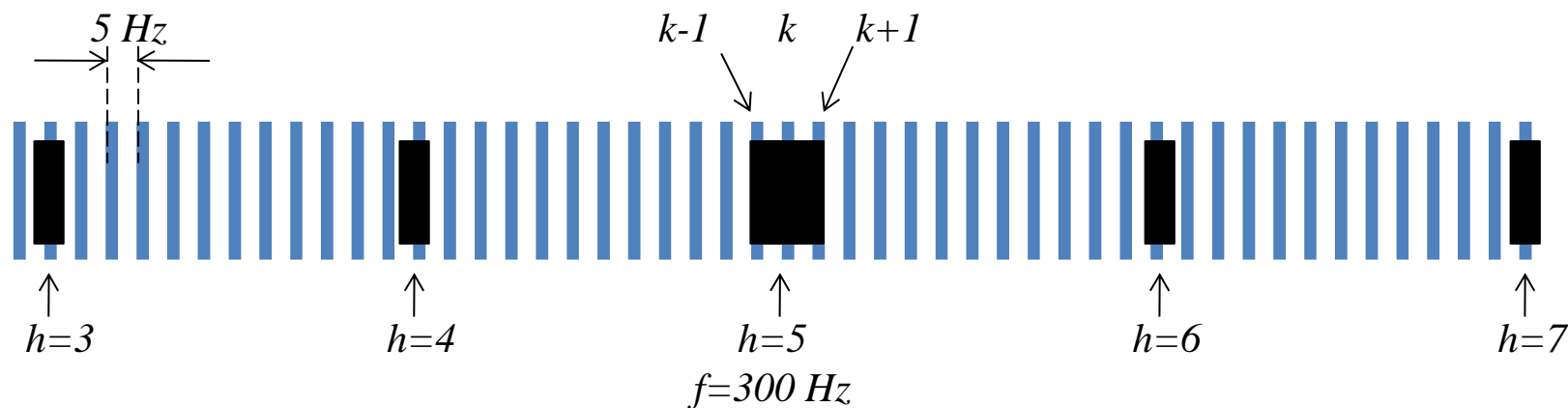
Filtrado (smoothing) de armónicos

- Para la componente fundamental $Y_{H,1}$, el mismo filtrado del valor de la salida 1 debe realizarse.
- Si los límites de emisión incluyen los factores de distorsión THD_Y o $PWHD_{H,Y}$ derivados de las componentes armónicas $Y_{H,h}$, deben calcularse usando los valores de la salida 2A

Evaluación de Subgrupos de armónicos de tensión

La Transformada de Fourier asume que la señal es estacionaria. Sin embargo, la amplitud de la tensión del sistema de potencia puede fluctuar, esparciendo la energía de las componentes armónicas a frecuencias espectrales adyacentes. Para mejorar la exactitud de la medición de tensión, las componentes $U_{C,k}$ de la salida A, para cada TDF_{BIN} de 5 Hz debe agruparse de acuerdo a las siguientes ecuación y figura:

$$Y_{sg,h}^2 = \sum_{k=-1}^{k=1} Y_{C,(N \times h) + k}^2$$



Sub-Grupo de armónicas

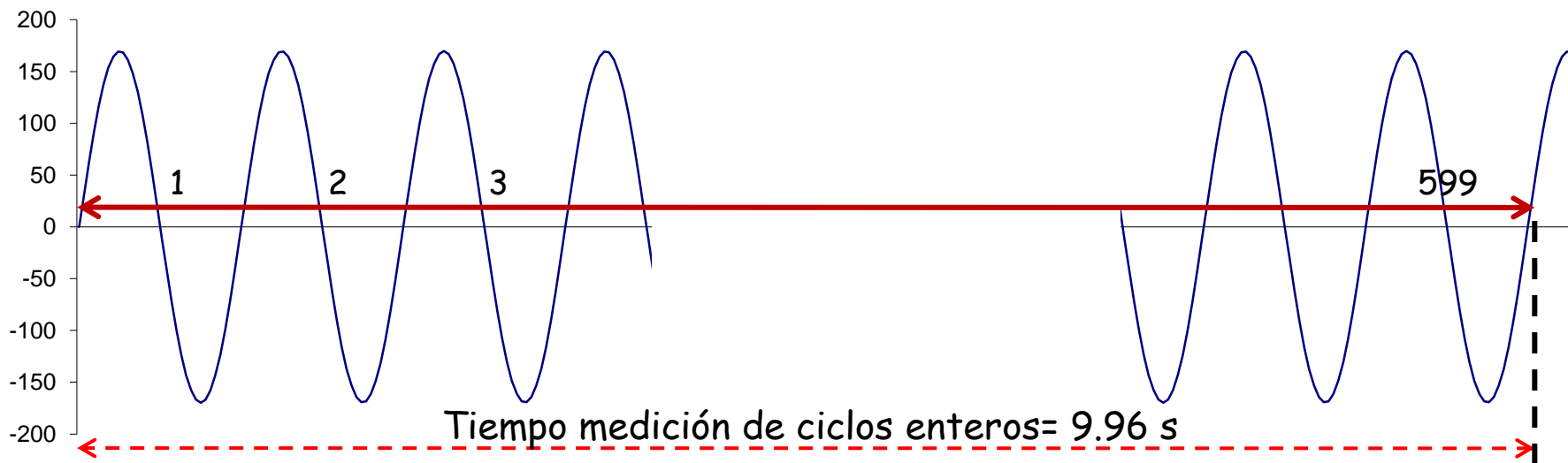
5. Métodos de medición de parámetros de calidad de la energía eléctrica

5.1 Frecuencia del sistema eléctrico

Clases A y S: incertidumbre medición (no debe exceder ± 0.01 Hz)

- repetición de medición de $f_1 = 10$ minutos
- intervalo de medición = 10 segundos
- frecuencia medida
$$f_{1med} = \frac{\text{número de ciclos enteros}}{\text{duración de ciclos enteros}}$$
- atenuación de armónicos, subarmónicos para no afectar la medición de f_1
- intervalos de tiempo de medición : no traslapados
- inicio de intervalo de 10 segundos a ± 20 ms (50 Hz); ± 16.7 ms (60Hz)
- no requiere agregación

Método de medición: conteo de cruces por cero

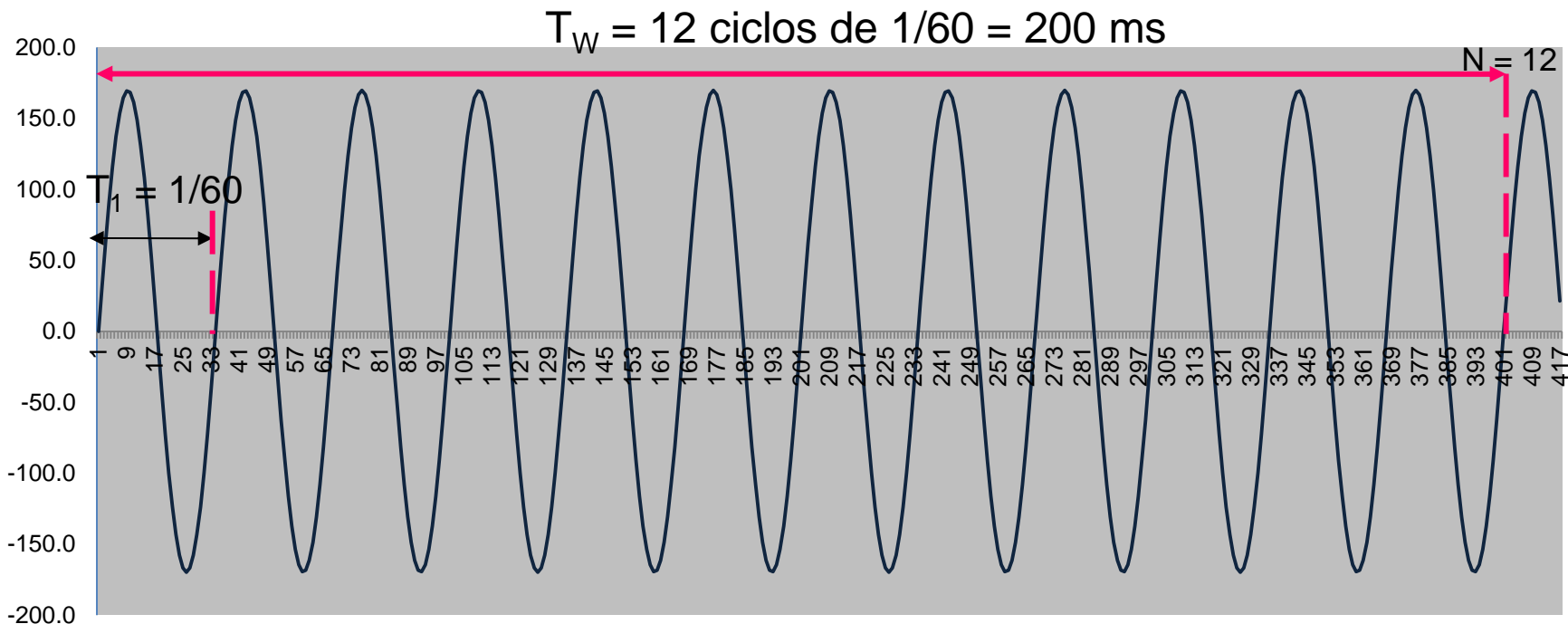


$$f_{1med} = \frac{599 \text{ ciclos enteros}}{9.96 \text{ s}} = 60.14 \text{ Hz}$$

5.2 Tensión nominal. Clase A. $\text{Inc} < 0.1 \%$ de U_{din}

$$U_{\text{RCM}} \pm 0.1 \% \text{ de } U_{\text{din}}$$

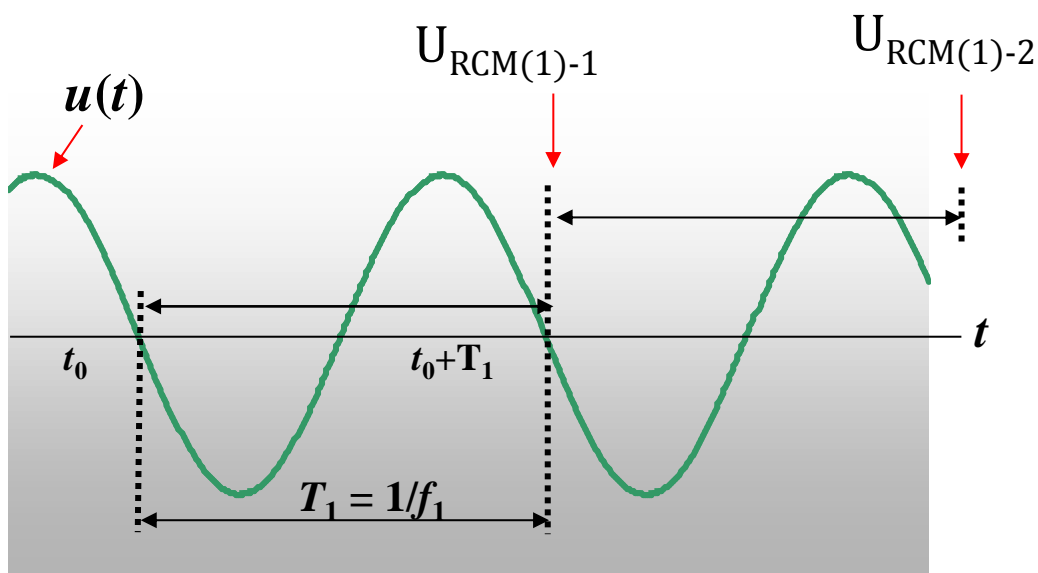
- medida en 12 ciclos para $f_1 = 60 \text{ Hz}$
- los intervalos de 12 ciclos no deben traslaparse
- el valor RMS incluye la fundamental, armónicos y subarmónicos
- este método es para señales en estado cuasi-estacionario: no se utiliza para medir abatimientos, incremento, interrupciones o transitorios



5.2 Tensión nominal. Clase A, B. Inc ± 0.1 % de U_{din}

Medición básica $U_{\text{RCM}(1)}$:

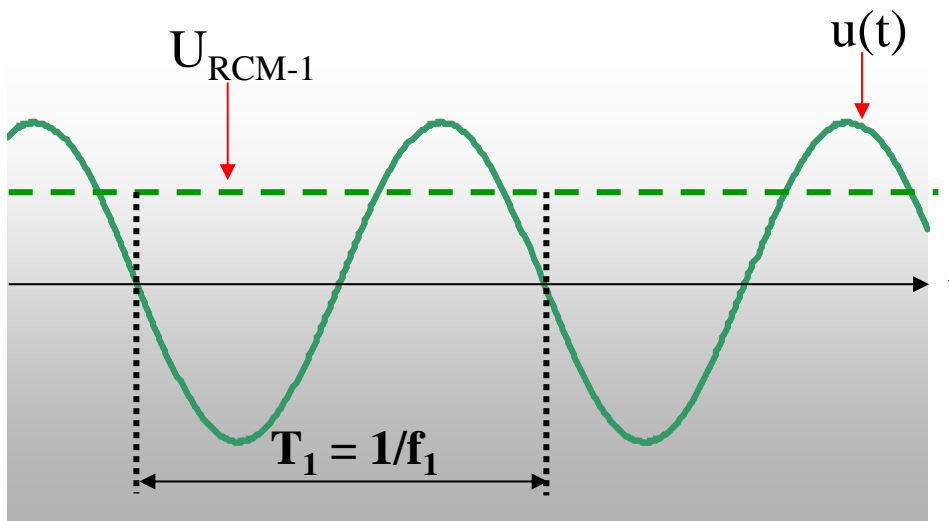
- valor RCM de tensión medido sobre un ciclo y refrescado cada ciclo.
- esta técnica no define cuando comienza un ciclo



$$U_{\text{RCM}(1)} = \sqrt{\int_t^{t+T} \frac{u^2(t)}{T} dt}$$

5.2 Tensión nominal. Clase A,B. Inc ± 0.1 % de U_{din}

$$U_{RCM(1)} = \sqrt{\int_t^{t+T} \frac{u^2(t)}{T} dt}$$

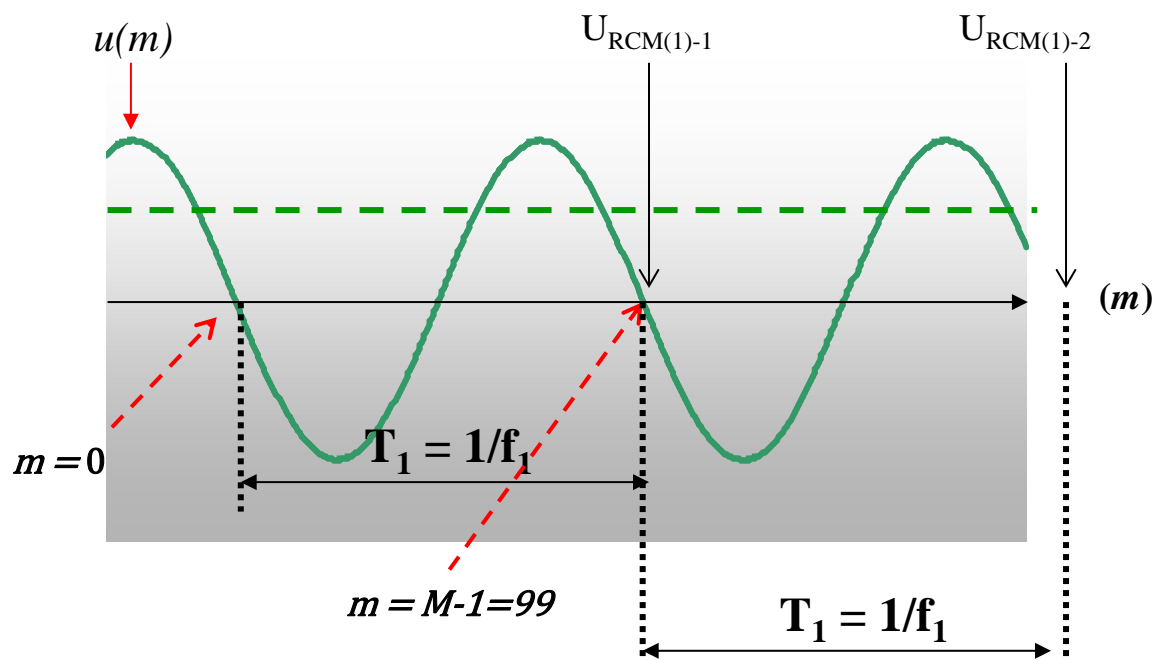


- Inc ± 0.1 U_{din} entre $10\% < U_{din} < 150\%$
- Comprende un ciclo completo
- El ciclo se mide en cruces por cero
- Se puede refrescar cada $\frac{1}{2}$ ciclo $U_{RCM}(1/2)$
- El valor RCM incluye armónicos, interarmónicos, señalización
- Si se usa para señales cuasi-estacionarias
- No se usa en detección o evaluación de dip, swell o interrupción

$U_{RCM}(1) = \text{valor } RCM \text{ refrescado cada ciclo}$

$$U_{RCM(1)-k} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=kM}^{m=M(k+1)-1} u^2(m)}$$

k	m ($M=100$)
0	0 → 99
1	100 → 199
2	200 → 299
3	300 → 399
4	400 → 499

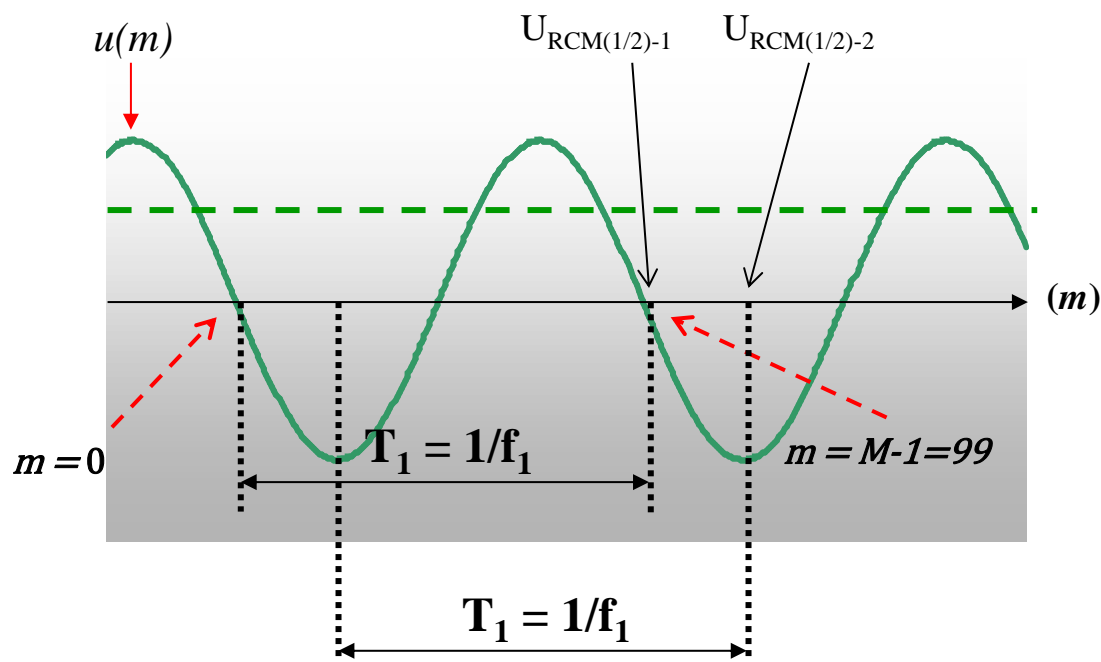


La señal $u(m)$
digitalizada tiene
 M muestras por
ciclo

$U_{RCM}(1/2) = \text{valor } RCM \text{ refrescado cada medio ciclo}$

$$U_{RCM(1/2)-k} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=\frac{kM}{2}}^{m=M\left(1+\frac{k}{2}\right)-1} u^2(m)}$$

k	m ($M=100$)
0	0 → 99
1	50 → 149
2	100 → 199
3	150 → 249
4	200 → 299



La señal $u(m)$
digitalizada tiene
 M muestras por
ciclo

5.3 Abatimientos e incrementos de tensión

1. Método de medición
2. Detección y evaluación de abatimientos (Dip, Sag)
3. Detección y evaluación de incrementos (Swell)
4. Cálculo de tensión de referencia de deslizamiento
5. Incertidumbre de medición de duración
6. Agregaciones

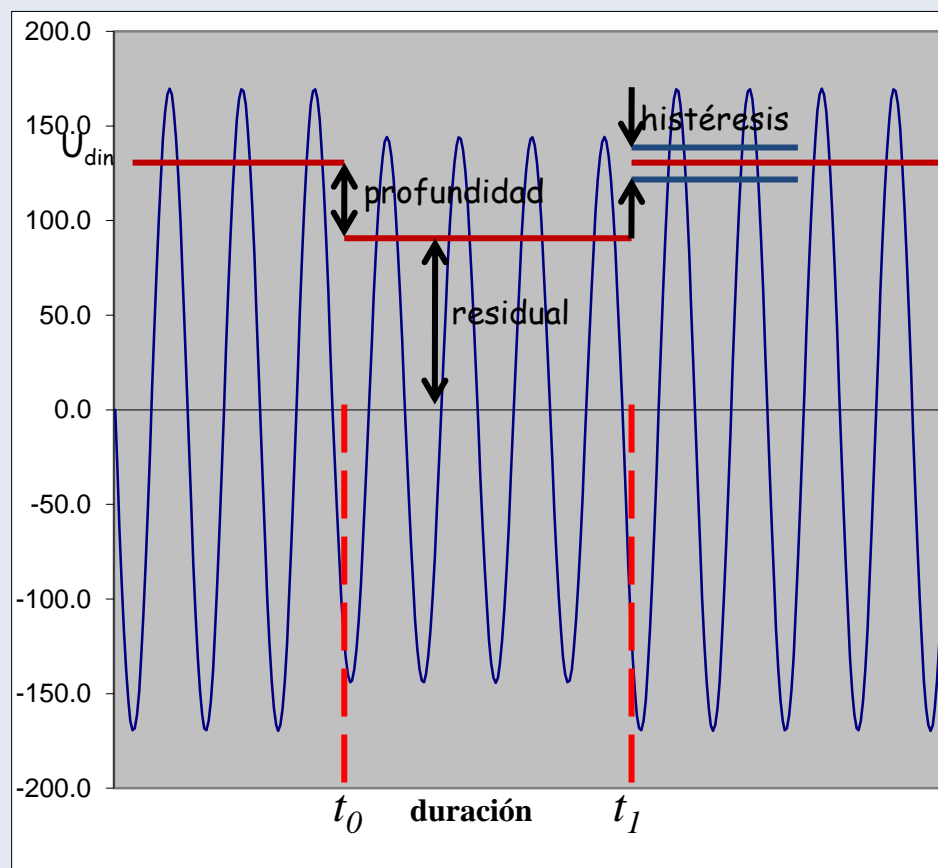
Abatimientos de tensión (DIP/sag) : reducción temporal de la tensión por arriba de un nivel determinado

Modelo matemático

$$v(t) = V_A(t) V_{RMS} \text{sen}[\phi_A(t)]$$

- Profundidad = porcentaje de U_{DIN} o U_{SR}
- Residual U_{res}
- Nivel de disparo = U_{DIN} o U_{SR}
- Histéresis = 2 % U_{din}
- Medición básica = $U_{RCM (1/2)}$
- Evaluación: U_{res}
- Incertidumbre $U_{res} < 0.2 U_{din}$

Forma de onda



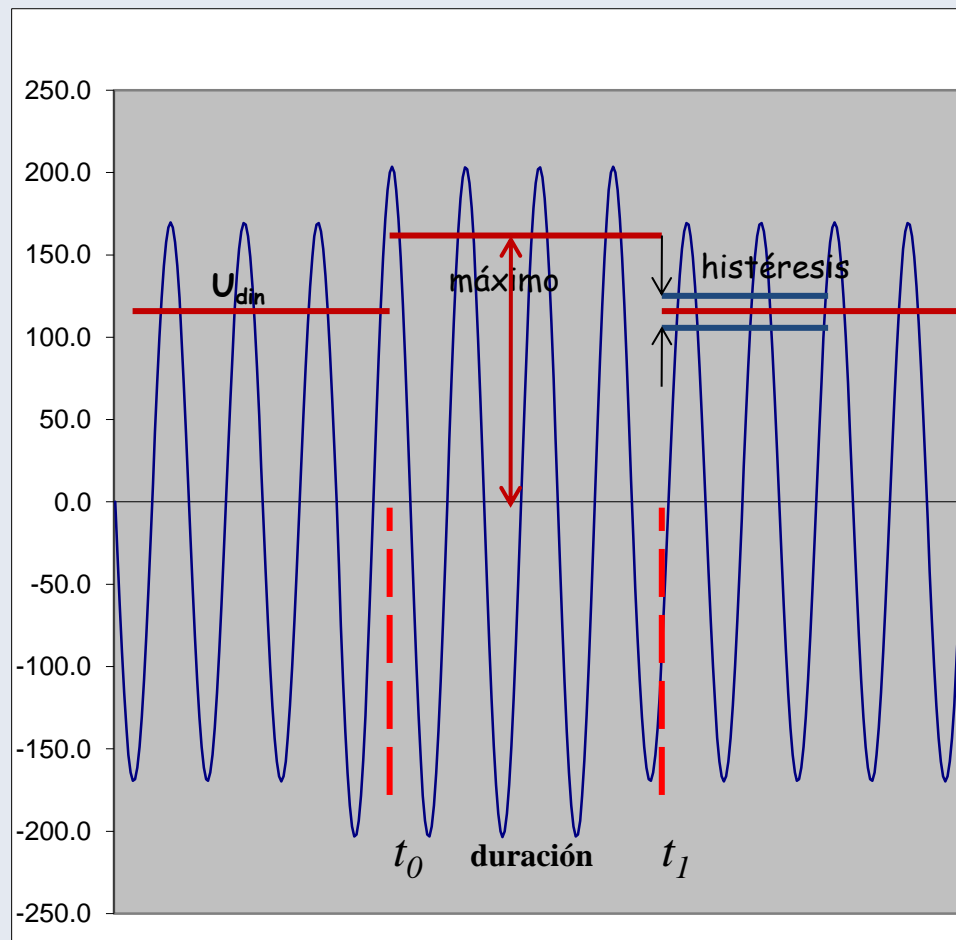
Incremento de tensión (SWELL) : incremento temporal de la tensión por debajo de un nivel determinado

Modelo matemático

$$v(t) = V_1(t) \text{sen}[\phi_1(t)]$$

- Altura = porcentaje de U_{DIN} o U_{SR}
- Nivel de disparo = U_{DIN} o U_{SR}
- Histéresis = 2 % U_{din}
- Medición básica = $U_{RCM (1/2)}$
- Evaluación: U_{MAX}
- Incertidumbre $U_{SWELL} < 0.2 U_{din}$

Forma de onda



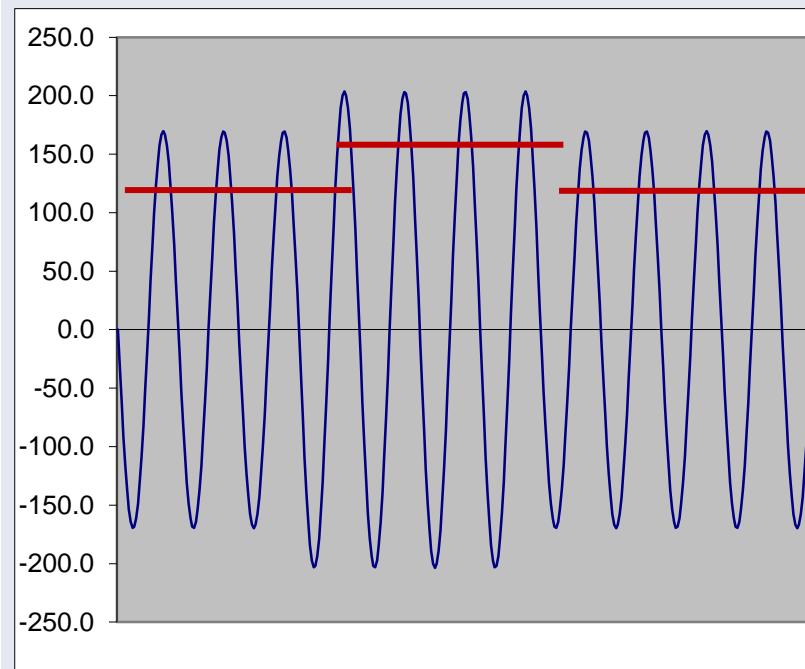
Determinación de la tensión de deslizamiento de referencia U_{SR}

Modelo matemático

$$U_{SR(n)} = 0.9967 U_{SR(n-1)} + 0.0033 U_{RMS}$$

- la referencia de deslizamiento U_{SR} , es la salida de un filtro de paso bajo con una constante de tiempo de 1 minuto
- es opcional su medición

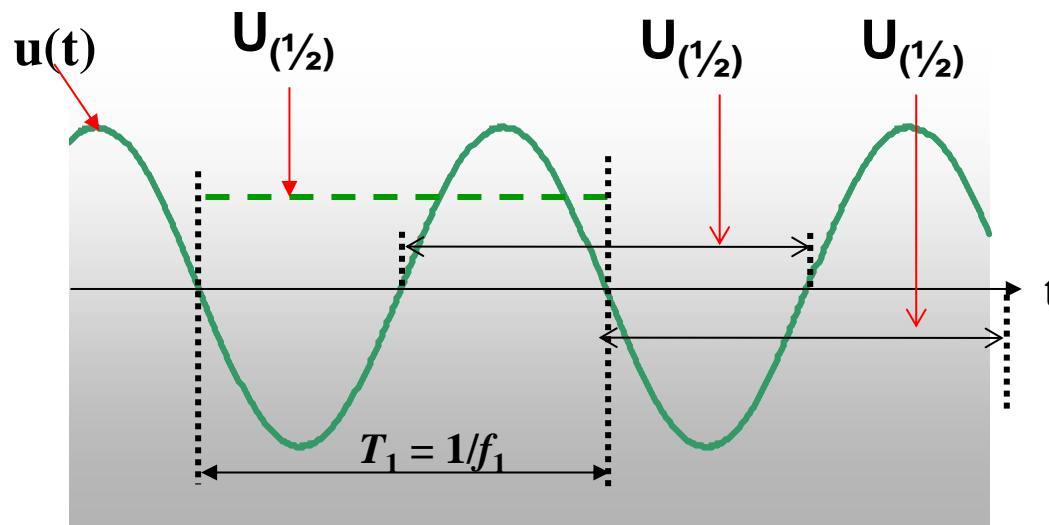
Forma de onda



Cálculo de la tensión de deslizamiento de referencia U_{SR}

Medición básica : $U_{RMS(1/2)}$: es el valor RMS de tensión medido sobre un ciclo completo, comenzando en un cruce por cero de la frecuencia fundamental y refrescado cada medio ciclo

- solamente se utiliza para medir : dip / swell / interrupción



Medición básica U_{SR} : (sliding reference)

- Amplitud de tensión promediada sobre un intervalo de tiempo específico que representa la tensión que precede a un evento de cambio de tensión, por ejemplo: abatimiento o incremento de tensión; cambios rápidos de tensión.
- La implementación es opcional.
- La implementación de una referencia de deslizamiento (SR) se realiza usando un filtro de primer orden con una constante de tiempo de 1 minuto.

El filtro digital está dado por:

$$U_{SR}(n) = 0.996\ 7\ U_{SR}(n-1) + 0.003\ 3\ U_{RCM}(12)$$

donde:

$U_{SR}(n)$ es el valor actual de U_{SR}

$U_{SR}(n-1)$ es el valor previo de U_{SR}

$U_{RCM}(12)$ es el valor RCM más reciente (12 ciclos para $f = 60$ Hz)

5.6 Desbalance en el suministro de tensión.

Medición básica :se utiliza el método de Componentes Simétricas.

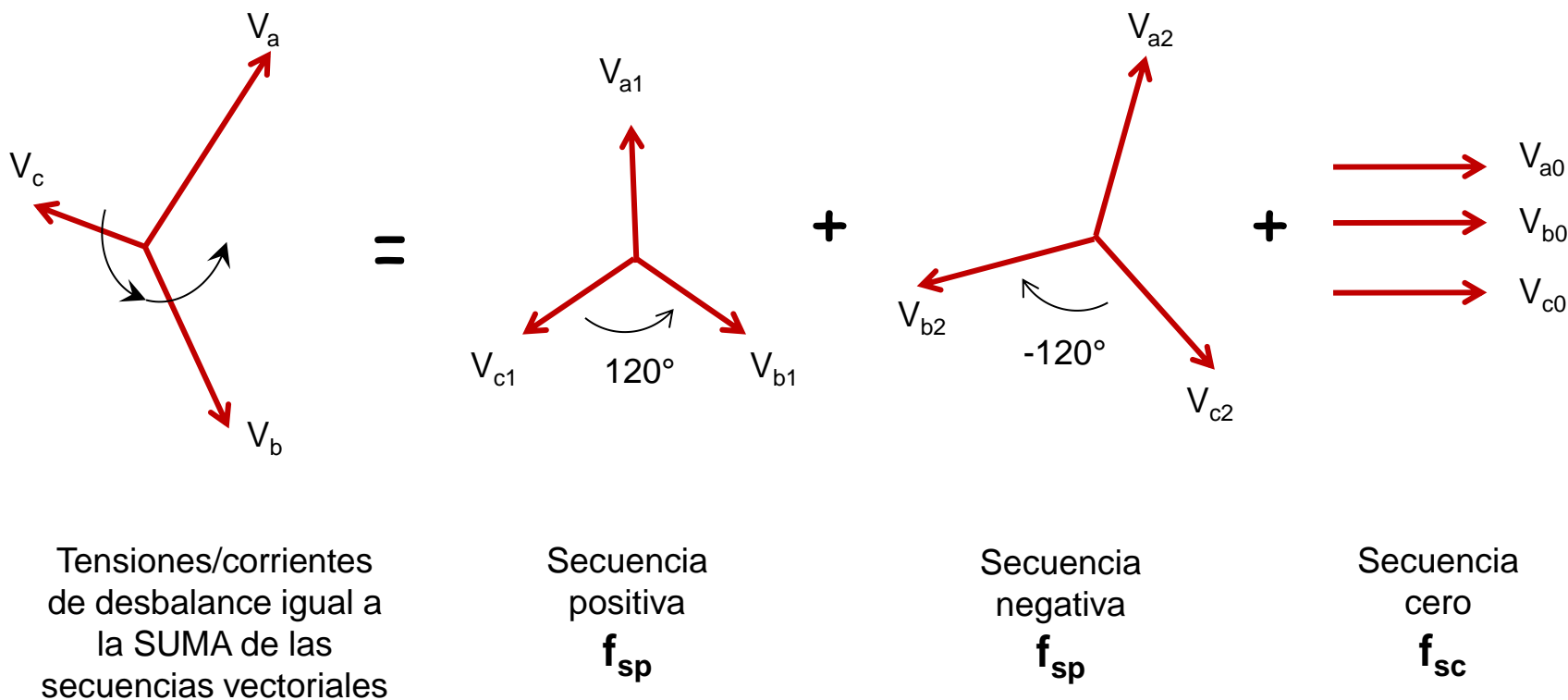
- en desbalance siempre existe la componente de secuencia positiva (u_1); adicionalmente, alguna de las componentes cero (u_0) y/o negativa (u_2)
- para determinar componentes, se mide la componente fundamental del valor RMS de la señal de entrada, en intervalos de tiempos de 12-ciclos
- componente de secuencia negativa:
$$u_2 = \frac{\text{secuencia negativa}}{\text{secuencia positiva}} 100\%$$
- componente de secuencia cero:
$$u_0 = \frac{\text{secuencia cero}}{\text{secuencia positiva}} 100\%$$

NOTA: el efecto de armónicos será minimizado por el uso de un filtro o por el uso del algoritmo Discrete Fourier Transform

5.6 Desbalance en el suministro de tensión

Método de Componentes Simétricas

- convierte fasores desbalanceados (tensión o corriente), en tres conjuntos de secuencia de fase positiva (f_{sp}), negativa (f_{sn}) y cero (f_{sc})
- una secuencia desbalanceada es igual a la suma de $f_{sp} + f_{sn} + f_{sc}$



5.6 Desbalance en el suministro de tensión

$$V_a = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2}$$

$$V_b = V_{a0} + h^2 V_{a1} + h V_{a2}$$

$$V_c = V_{a0} + h V_{a1} + h^2 V_{a2}$$

$$\underbrace{\phantom{V_{a0}}}_{\text{Fasores desbalanceados}} + \underbrace{\phantom{h V_{a1} + h^2 V_{a2}}}_{\text{Secuencias fasoriales}}$$

$$h = e^{j\frac{2\pi}{3}} = 1\angle 120^\circ = -0.5 + j0.866$$

$$h^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = 1\angle 240^\circ = -0.5 - j0.866$$

$$h^3 = e^{j2\pi} = 1\angle 360^\circ = 1\angle 0^\circ = 1$$

5.6 Desbalance en el suministro de tensión

Las componentes de secuencia CERO:

$$V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \qquad V_{a0} = V_{b0} = V_{c0}$$

Las componentes de secuencia POSITIVA:

$$V_{a1} = \frac{1}{3}(V_a + hV_b + h^2V_c) \qquad V_{b1} = h^2V_{a1} \qquad V_{c1} = hV_{a1}$$

Las componentes de secuencia NEGATIVA:

$$V_{a2} = \frac{1}{3}(V_a + h^2V_b + hV_c) \qquad V_{b2} = hV_{a2} \qquad V_{c2} = h^2V_{a2}$$

5.6 Desbalance en el suministro de tensión

Desempeño Clase A: Para sistemas de tres fases, la relación de secuencia negativa u_2 se puede evaluar en términos de las tensiones fase a fase:

$$u_2 = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} * 100\% \quad \text{con } \beta = \frac{U_{12\text{fund}}^4 + U_{23\text{fund}}^4 + U_{31\text{fund}}^4}{(U_{12\text{fund}}^2 + U_{23\text{fund}}^2 + U_{31\text{fund}}^2)^2}$$

La relación de secuencia cero u_0 se evalúa así:

$$u_0 = \frac{U_0}{U_1} \times 100\% = \frac{\text{secuencia cero}}{\text{secuencia positiva}} \times 100\%$$

Desempeño Clase S: la relación de secuencia negativa se evalúa igual que en Clase A. La evaluación de secuencia cero es opcional.

5.6 Desbalance en el suministro de tensión: incertidumbre

Clase A: Si se aplica a la entrada una tensión trifásica se aplica a la entrada, el instrumento debe presentar una incertidumbre menor que ± 0.15 % de ambos U_2 y U_0 .

Nota: la señal trifásica debe cumplir los requisitos de la “etapa 1 de prueba” (ver Tabla 2), excepto para desbalance negativo y cero en el intervalo 1% a 5 % de U_1

Ejemplo:

señal de entrada = desbalance de secuencia negativa = 1 %.

el resultado de medición debe estar entre 0.85 % y 1.15 %

Clase S: la misma de clase A, pero la tolerancia es de ± 0.3 % para U_2 y U_0 (si se evalúa la secuencia cero)

5.6 Desbalance en el suministro de tensión: incertidumbre

Tabla 2. Verificación de incertidumbre estado estable para clases A y S

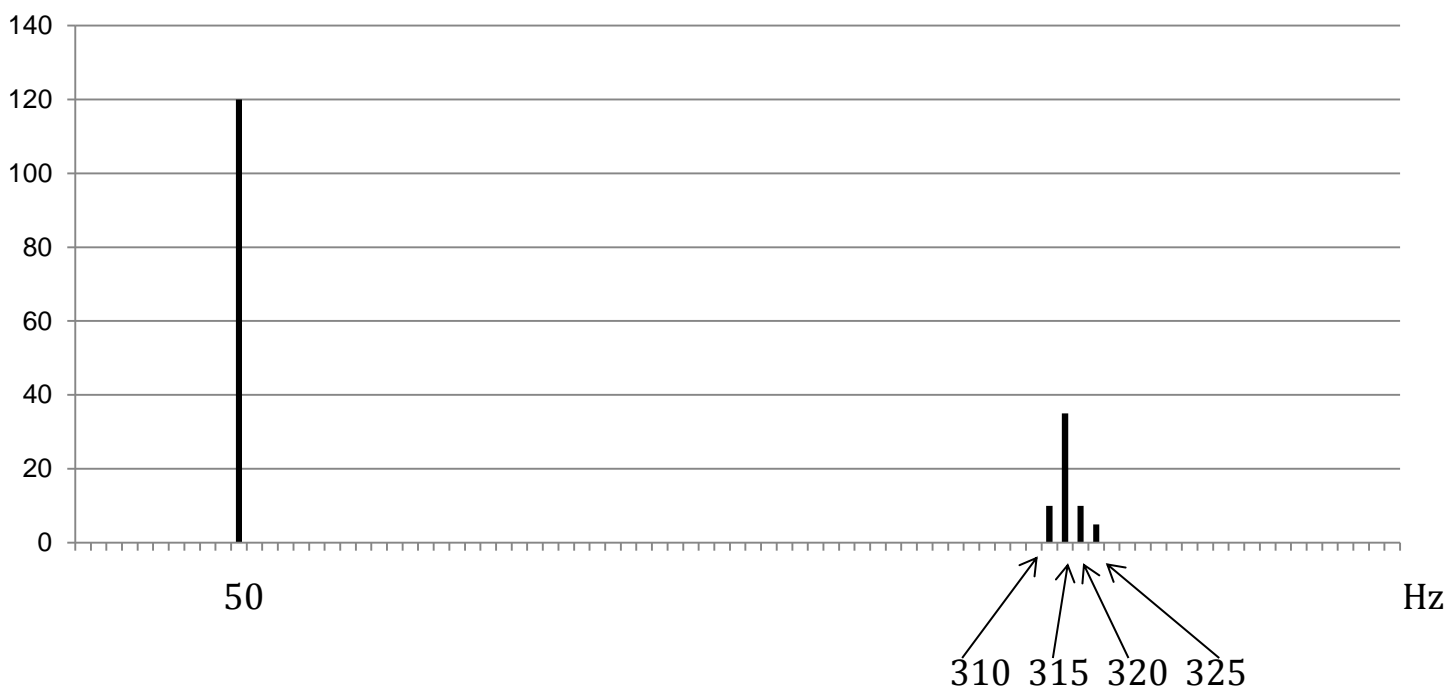
Magnitudes de influencia	Etapas de prueba 1	Etapas de prueba 2	Etapas de prueba 3
Frecuencia	$f_{nom} \pm 0.5 \text{ Hz}$	$f_{nom} - 1 \text{ Hz} \pm 0.5 \text{ Hz}$	$f_{nom} + 1 \text{ Hz} \pm 0.5 \text{ Hz}$
Amplitud de tensión	$U_{din} \pm 1 \%$	Determinado por flicker, desbalance, armónicas o interarmónicas	Determinado por flicker, desbalance, armónicas o interarmónicas
Flicker	$P_{st} < 0.1$	$P_{st} = 1 \pm 0.1$ modulación rectangular a 39 cambios por minuto	$P_{st} = 4 \pm 0.1$ modulación rectangular a 110 cambios por minuto
Desbalance	100 % \pm 0.5 % de U_{din} en todos canales. Todos ángulos de fase a 120° (equivale a $u_0 = 0\%$; $u_2 = 0\%$)	73 % \pm 0.5 % de U_{din} canal 1 80 % \pm 0.5 % de U_{din} canal 2 87 % \pm 0.5 % de U_{din} canal 3 Todos los ángulos de fase a 120 ° (equivale a $u_0 = 5.05\%$; $u_2 = 5.05\%$)	152 % \pm 0.5 % de U_{din} canal 1 140 % \pm 0.5 % de U_{din} canal 2 128 % \pm 0.5 % de U_{din} canal 3 Todos los ángulos de fase a 120 ° (equivale a $u_0 = 4.95\%$; $u_2 = 4.95\%$)
Armónicas	0 % a 3 % de U_{din}	10 % \pm 3 % de U_{din} de 3ª a 0° 5 % \pm 3 % de U_{din} de 5ª a 0° 5 % \pm 3 % de U_{din} de 29ª a 0°	10 % \pm 3 % de U_{din} de 7ª a 180° 5 % \pm 3 % de U_{din} de 13ª a 0° 5 % \pm 3 % de U_{din} de 25ª a 0°
Interarmónicos	0 % a 0.5 % de U_{din}	1 % \pm 0.5 % de U_{din} a 7.5 veces f_{nom}	1 % \pm 0.5 % de U_{din} a 3.5 veces f_{nom}

Señalización en suministro de tensión. Método de medición

Clase A. Ejemplo: En un sistema de 50 Hz se tiene una señal de control de 35 V en la frecuencia de 316.67 Hz.

Medición: se toma la raíz de la suma de cuadrados de valores RCM de las frecuencias aledañas: 310 Hz, 315 Hz, 320 Hz y 325 Hz.

$$U_{sg,h} = \sqrt{\sum U_{sg,1}^2 + U_{sg,2}^2 + U_{sg,3}^2 + U_{sg,4}^2}$$



Cambios rápidos de tensión. Método de medición

NOTA.

Cláusula 5 proporciona información de los parámetros significantes necesarios para caracterizar un cambio rápido de tensión.

Medición de baja y sobre desviación. Método de medición

Clase A.

- El valor $U_{\text{RCM-200ms}}$ debe usarse para obtener los parámetros de baja o sobre tensión en porciento de U_{din} .

Determinación de baja desviación

$$\text{Si } U_{\text{RCM-200ms},i} > U_{\text{din}} \text{ entonces: } U_{\text{RCM-bajo},i} = U_{\text{din}} \quad (1)$$

$$\text{Si } U_{\text{RCM-200ms},i} \leq U_{\text{din}} \text{ entonces: } U_{\text{RCM-bajo},i} = U_{\text{RCM-200ms},i} \quad (2)$$

Determinación de sobre desviación

$$\text{Si } U_{\text{RCM-200ms},i} < U_{\text{din}} \text{ entonces: } U_{\text{RCM-sobre},i} = U_{\text{din}} \quad (1)$$

$$\text{Si } U_{\text{RCM-200ms},i} \geq U_{\text{din}} \text{ entonces: } U_{\text{RCM-sobre},i} = U_{\text{RCM-200ms},i} \quad (2)$$

Nota. En sistemas unifásicos hay una determinación de baja desviación sencilla y un valor de sobre desviación para cada intervalo. En sistemas trifásicos hay tres valores para cada intervalo. Cualquiera de 6 valores o 3 valores pueden medirse en sistemas de 4-hilos.

Medición de baja y sobre tensión. Incertidumbre y agregación

Los valores RCM de 12 ciclos subyacentes deben ser consistentes con los requisitos de 5.2.2 (incertidumbre de medición de la tensión del suministro)

6. Magnitudes de influencia en la medición de parámetros de calidad de la energía eléctrica

Magnitudes de influencia

La medición de una característica específica puede ser afectada adversamente por la presencia de un disturbio (magnitud de influencia) en la señal eléctrica bajo medición. Por ejemplo, en la medición del desbalance del suministro de tensión puede afectarse si la forma de onda de la tensión es sujeta al mismo tiempo, de un disturbio de armónicas.

El resultado de medición de un parámetro de calidad de la potencia debe estar dentro de la incertidumbre especificada dada en las cláusulas anteriores cuando todos los otros parámetros están dentro de su intervalo de variación según la siguiente tabla:

Tabla 1. Intervalo de magnitudes de influencia; desempeño clase A

Magnitudes de influencia	Intervalo de variación
Frecuencia	42.5 Hz a 57.5 Hz para sistemas de 50 Hz 51 Hz a 69 Hz para sistemas de 60 Hz
Amplitud de tensión (estado estable)	0 % al 200 % de U_{din}
Flicker (P_{st})	0 a 20
Desbalance	0 % a 5 %
Armónicos (distorsión armónica total)	El doble de los valores en IEC61000-2-4, clase 3
Inter-armónicos a cualquier frecuencia	El doble de los valores en IEC61000-2-4, clase 3
Señalización en la tensión principal	0 % a 9 % de U_{din}
Transitorios de tensión IEC 61180	6 kV pico
Transitorios rápidos	4 kV pico
Nota: P_{st} debe ser producido mediante una modulación periódica	

Intervalo de magnitudes de influencia, desempeño clase B:

Tabla 2. Intervalo de magnitudes de influencia; desempeño clase B

Magnitudes de influencia	Intervalo de variación
Frecuencia	42.5 Hz a 57.5 Hz para sistemas de 50 Hz 51 Hz a 69 Hz para sistemas de 60 Hz
Amplitud de tensión (estado estable)	0 % al 150 % de U_{din}
Desbalance	0 % a 5 %
Armónicos (distorsión armónica total)	El doble de los valores en IEC61000-2-4, clase 3
Inter-armónicos a cualquier frecuencia	El doble de los valores en IEC61000-2-4, clase 3
Señalización en la tensión principal	0 % a 9 % de U_{din}

Intervalo de magnitudes de influencia/ verificación

Verificación de la influencia de magnitudes en medidores:

1. La incertidumbre de un instrumento debe probarse para cada magnitud de medición:
 - seleccione la magnitud a ser medida
 - manteniendo todas las otras magnitudes en estado de prueba 1, verifique la incertidumbre de la magnitud medida a ser probada en 5 puntos igualmente espaciados en el intervalo de la magnitud de influencia
 - manteniendo todas las otras magnitudes de influencia en el estado de prueba 2, repita la prueba
 - manteniendo todas las otras magnitudes de influencia en el estado de prueba 3, repita la prueba
2. Otros tipos de pruebas pueden usarse adicionalmente a los especificados en las tablas anteriores.

Intervalo de magnitudes de influencia/ verificación. Tabla 2 (clase A)

Magnitudes de influencia	Estado prueba 1	Estado prueba 2	Estado prueba 3
Frecuencia	$f_{nom} \pm 0.5 \text{ Hz}$	$f_{nom} - 1 \text{ Hz} \pm 0.5 \text{ Hz}$	$f_{nom} + 1 \text{ Hz} \pm 0.5 \text{ Hz}$
Amplitud de tensión	$U_{din} \pm 1 \%$	Determinado por flicker, desbalance, armónicos e inter-armónicos (abajo)	Determinado por flicker, desbalance, armónicos e inter-armónicos (abajo)
Parpadeo (flicker)	$P_{st} < 0.1$	$P_{st} = 1 \pm 0.1$ modulación rectangular a 39 cambios por minuto	$P_{st} = 4 \pm 0.1$ modulación rectangular a 110 cambios por minuto Nota: esto solo aplica a valores de 10 min; otros valores usar $P_{st} = 0$ a 0.1
Desbalance	0% a 0.5 % de U_{din}	0.73 % \pm 0.5 % de U_{din} fase A 0.80 % \pm 0.5 % de U_{din} fase B 0.87 % \pm 0.5 % de U_{din} fase C Todos los ángulos fase a 120 °	1.52 % \pm 0.5 % de U_{din} fase A 1.40 % \pm 0.5 % de U_{din} fase B 1.28 % \pm 0.5 % de U_{din} fase C Todos los ángulos fase a 120 °
Armónicos	0% a 3 % de U_{din}	10% \pm 3% de U_{din} 3ª armónica a 0° 5% \pm 3% de U_{din} 5ª armónica a 0° 5% \pm 3% de U_{din} 29ª armónica a 0°	10% \pm 3% de U_{din} 7ª armónica a 0° 5% \pm 3% de U_{din} 13ª armónica a 0° 5% \pm 3% de U_{din} 25ª armónica a 0°
Inter-armónicos	0% a 0.5% de U_{din}	1% \pm 0.5% de U_{din} a $7.5 f_{nom}$	1% \pm 0.5% de U_{din} a $3.5 f_{nom}$

GRACIAS

rene.carranza@cenam.mx