



Monitorización de la calidad del suministro de energía eléctrica

Gabriel Ordóñez Plata

gaby@uis.edu.co

Curso:

**CALIDAD DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA
ELÉCTRICA**

Cartagena de Indias, Colombia - febrero, 2002

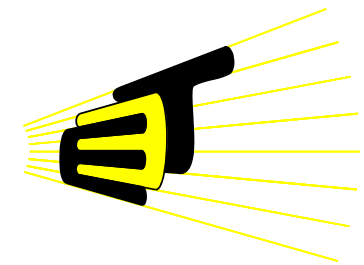




Programa ALURE - Proyecto CREG



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA (IIT)





Contenido

- **Introducción**
- **Transductores**
- **Sistemas de medición**
- **Monitorización de transitorios y eventos**
- **Monitorización de fluctuaciones**
- **Monitorización del estado estacionario**
- **Conclusiones**



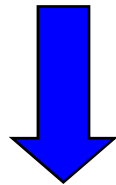
Introducción: señales a monitorizar



SEÑALES ELÉCTRICAS

➤ Tensión

➤ Corriente



CALIDAD DE LAS SEÑALES

➤ Perturbaciones

➤ Estado estacionario

Introducción: especificación de un estado estacionario



- **Amplitud de la señal**
- **Frecuencia fundamental de la señal**
- **Espectro de la señal**
- **Modulación de señales**
- **Impedancia de la fuente**
- **Altura de la muesca de la señal**
- **Área de la muesca de la señal**



Introducción: especificación de un estado transitorio



- **Velocidad de crecimiento**
- **Amplitud máxima**
- **Constante de tiempo**
- **Frecuencias**
- **Espectro de la señal**
- **Impedancia de la fuente**
- **Energía potencial**
- **Frecuencia de repetición**



Introducción: tipos de variaciones de la tensión



➤ **Perturbaciones**

- ✓ Transitorios
- ✓ Huecos de tensión (Sags o Dips)
- ✓ Elevaciones de tensión (Swells)
- ✓ Interrupciones

➤ **Variaciones en estado estable**

- ✓ Regulación de tensión
- ✓ Distorsión armónica
- ✓ Parpadeo (Flicker)
- ✓ Desbalance

Introducción: definiciones de calidad de onda según la IEEE 1159



	Frecuencia	Duración	Magnitud
Transitorios			
Impulsivos	> 5 kHz	< 200 μ s	
Oscilatorios			
Baja frecuencia	< 500 Hz	< 30 ciclos	
Media frecuencia	300 Hz – 2 kHz	< 3 ciclos	
Alta frecuencia	> 2 kHz	< 0,5 ciclos	
Variaciones de corta duración			
Huecos de tensión			
Instantáneos		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 p.u.
Momentáneos		30 ciclos – 3	0,1 – 0,9 p.u.
Temporales		3 s – 1 min	0,1 – 0,9 p.u.
Elevaciones de tensión			
Instantáneos		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 p.u.
Momentáneos		30 ciclos – 3	1,1 – 1,8 p.u.
Temporales		3 s – 1 min	1,1 – 1,8 p.u.



Introducción: definiciones de calidad de onda según la IEEE 1159



	Frecuencia	Duración	Magnitud
Variaciones de larga duración			
Subtensión		> 1 min	0,8 – 1,0 p.u.
Sobretensión		> 1 min	1,0 – 1,2 p.u.
Interrupciones			
Momentáneos		< 3 s	0 p.u.
Temporales		3 s – 1 min	0 p.u.
Colapso		> 1 min	0 p.u.
Armónicos			
Tensión	0 – 50 th	Estado estable	0 – 20 %
Corriente	0 – 50 th	Estado estable	0 – 100 %
Parpadeo			
	0,5 - 35 Hz	Intermitente	0,25 – 7 %
Muecas de tensión			
	20 kHz- 200 kHz	Estado estable	



Introducción: estándares internacionales (referencia 1)



Perturbación	Categoría de normalización	Estándares IEEE	Estándares IEC
Tensiones y corrientes armónicas (resonancia, TIF y muescas)	Ambiente/compatibilidad	Ninguna	IEC 61000-2-1/2
	Emisión/Límites de inmunidad	IEEE 519	IEC 61000-3-2/4 (555)
	Pruebas y Medidas	Ninguna	IEC 61000-4-7/13
	Instalación/Mitigación	IEEE 519A	IEC 61000-5-5
	Componente térmica	IEEE/ANSI C57.110	Ninguna
Nivel de tensión (Regulación, desbalance, fluctuaciones y parpadeo)	Ambiente/Compatibilidad	IEEE 141, 241, C84.1	IEC 38/BTTF 68-6
	Emisión/Límites de inmunidad	ANSI C84.1	IEC 61000-3-3/5 (555)
	Pruebas y Medidas	Ninguna	IEC 61000-4-1/14/15
	Instalación/Mitigación	IEEE 141, 241, 1100	IEC 61000-5-X
	Parpadeo de la luz	IEEE 141, 519	IEC 868 (61000-4-15)



Introducción: estándares internacionales (referencia 2)



Perturbación	Categoría de normalización	Estándares IEEE	Estándares IEC
Huecos de tensión	Ambiente/compatibilidad	IEEE 1250	IEC 61000-2-4
	Emisión/Límites de inmunidad	IEEE P 1346	IEC 61000-3-3/5 (555)
	Pruebas y Medidas	Ninguna	IEC 61000-4-1/11
	Instalación/Mitigación	IEEE 446, 1100, 1159	IEC 61000-5-X
	Apertura del fusible	IEEE 242 (Protección)	IEC 364
Transitorios y sobretensiones	Ambiente/Compatibilidad	IEEE/ANSI C62.41	IEC 61000-2-5
	Emisión/Límites de inmunidad	Ninguna	IEC 61000-3-X
	Pruebas y Medidas	IEEE/ANSI C62.45	IEC 61000-4-1/2/4/5/12
	Instalación/Mitigación	C62 series, 1100	IEC 61000-5-X
	Ruptura de aislamiento	Ninguna	IEC 664





Introducción: medidas a realizar

➤ Cantidades a medir

Tensión y corriente en las tres fases y el neutro de forma simultánea

➤ Interpretación de los resultados

Conocer las características típicas de los diferentes tipos de perturbaciones

➤ Selección de los acondicionadores de señal

➤ Selección de los equipos de medida



Introducción: caracterización de las señales de tensión y corriente

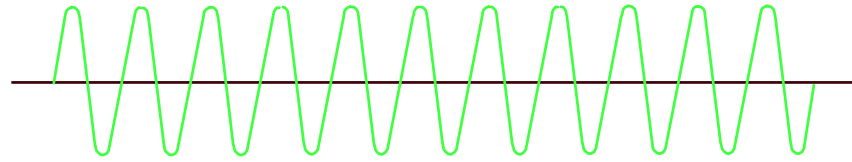


- **Valor instantáneo**
- **Valor eficaz**
- **Valor medio (componente de continua)**
- **Frecuencia fundamental**
- **Componentes armónicas: magnitud y ángulo de fase**
- **Interarmónicos y subarmónicos**
- **Distorsión armónica total**
- **Espectro de las señales**
- **Duración de un evento**
- **Fluctuaciones de tensión**
- **Componentes simétricas en sistemas trifásicos**
- **Desbalance de tensión en sistemas trifásicos**

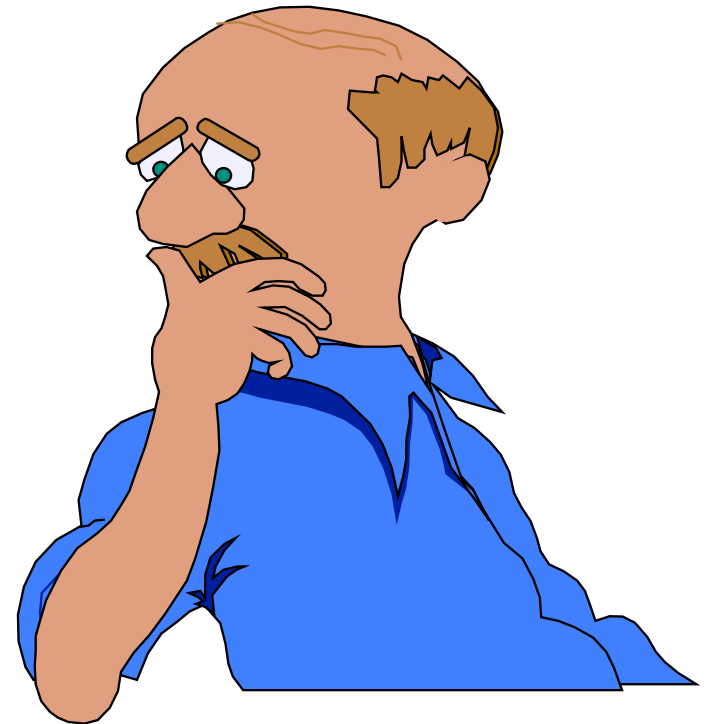
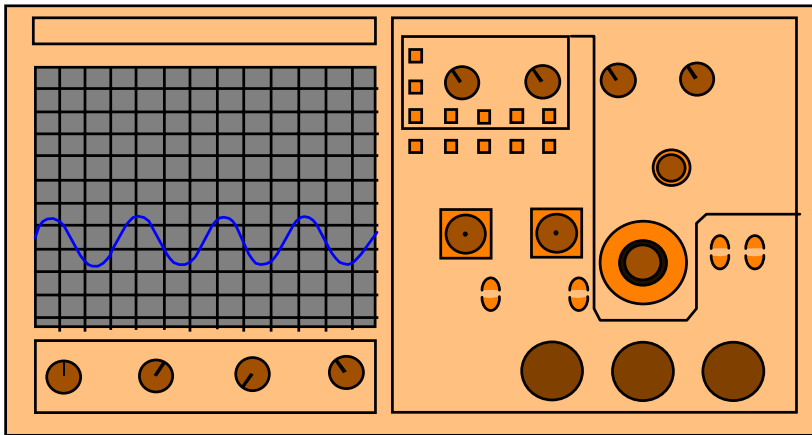
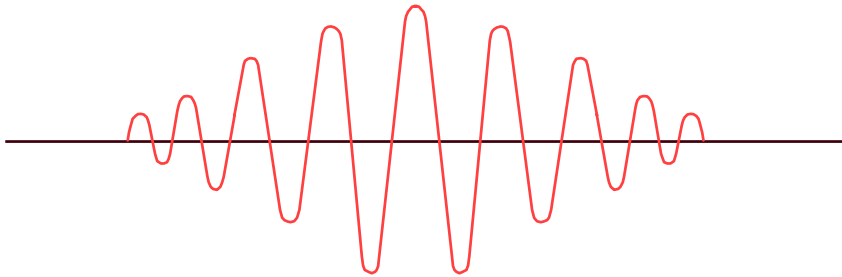




Introducción: instrumentos de medida



Calidad ?





Introducción: instrumentos de medida

	Problemas de tierras y cableado	Impulsos y transitorios	Variaciones de tensión	Interrupciones	Armónicos	Parpadeo	Ruido	Descargas Electrostáticas
Megometros y otros	■							
Multímetros	■		■				■	
Osciloscopios		■						
Analizadores de disturbios		■					■	
Analizadores de armónicos					■			
Analizadores de redes		■					■	
Medidores de Parpadeo						■		
Detectores de infrarrojos	■							
Medidores de campo							■	
Medidores estáticos								■
Medidores de Gauss							■	



Transductores: características básicas



➤ **Ancho de banda : 1- 5 kHz**

➤ **IEC 61000-4-7**

➤ **Error en magnitud $< 5\%$**

➤ **Error en ángulo de fase $< 5^\circ$**





Transformador de corriente:

- Utilizar el secundario de mayor relación de transformación
- Impedancia del burden pequeña
- Maximizar el factor de potencia del burden
- En lo posible el secundario debe estar en corto circuito

Transformador de tensión:

- El ancho de banda de transformadores de media tensión ($11\text{kV} < U < 110\text{ kV}$) es cercano a 1 kHz
- El ancho de banda de transformadores de alta tensión ($U > 110\text{ kV}$) es alrededor de 500 Hz
- Los transformadores convencionales mantienen la precisión de las medidas hasta el 5° armónico



Sistemas de medición: ¿Para qué?



- Contrastar índices obtenidos mediante medición con los límites recomendados o admisibles
- Chequear equipos que generan perturbaciones electromagnéticas
- Determinar que equipos puede estar afectando a otros instalados en el mismo sistema
- Obtener los índices de calidad en un sistema y hacer seguimiento periódico de estos índices
- Verificar con mediciones los análisis de los sistemas



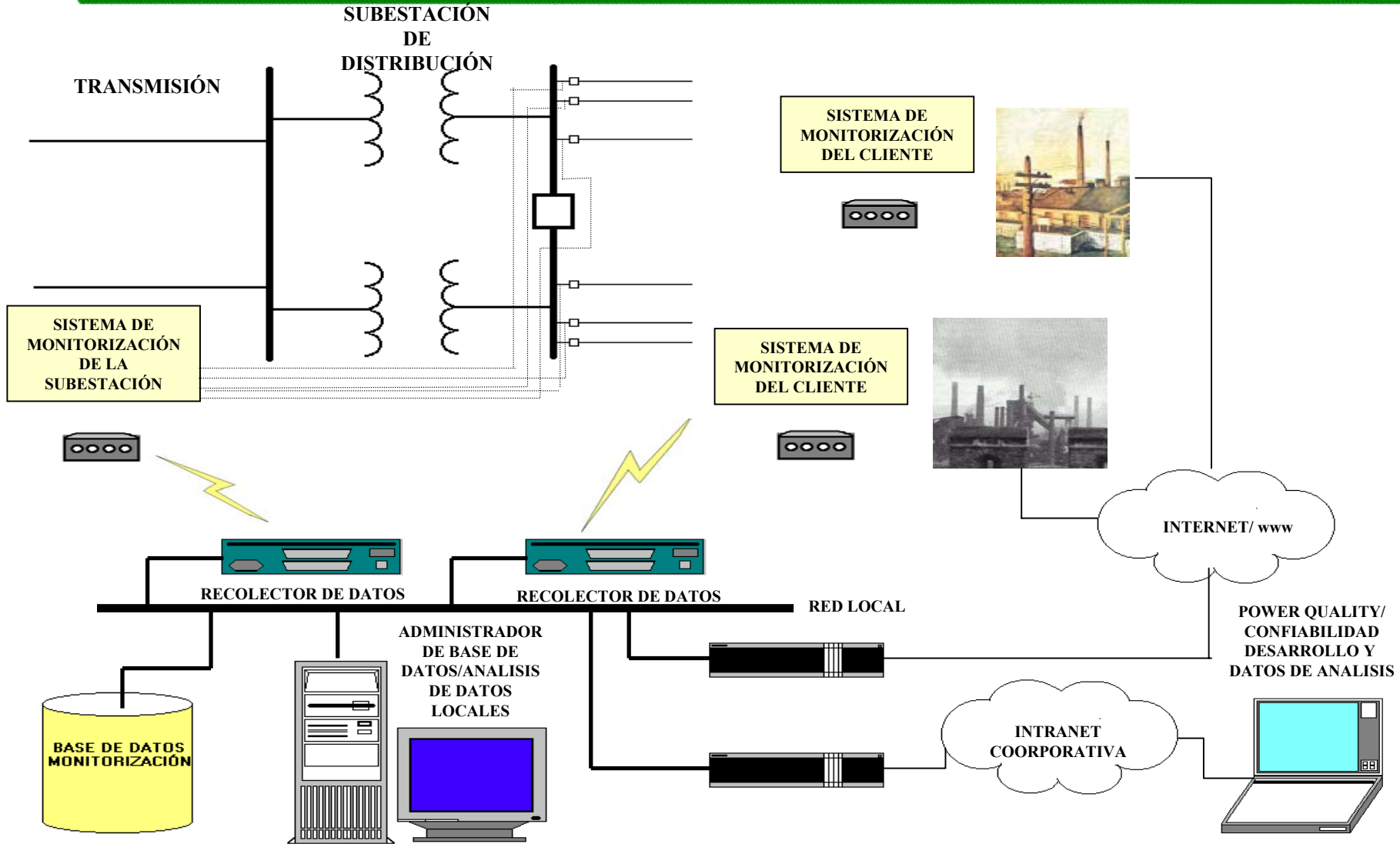
Sistemas de medición: ¿Para qué?



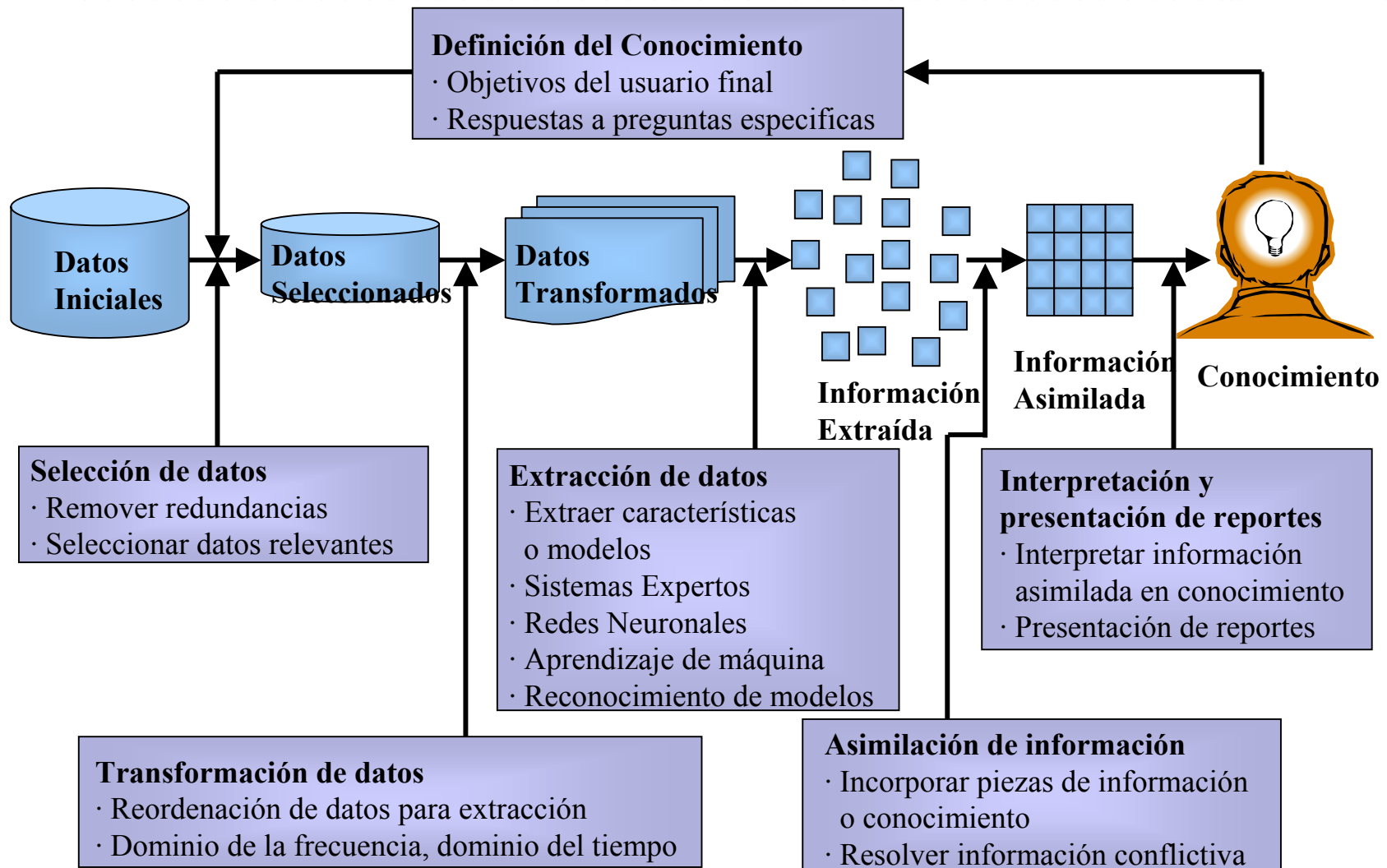
- Realizar ajustes de los modelos de dispositivos de sistemas eléctricos
- Determinar puntos críticos en el sistema
- Conocer el comportamiento de equipos o sistemas ante perturbaciones electromagnéticas
- Clasificar los eventos que se presentan en un sistema eléctrico mediante técnicas de inteligencia artificial



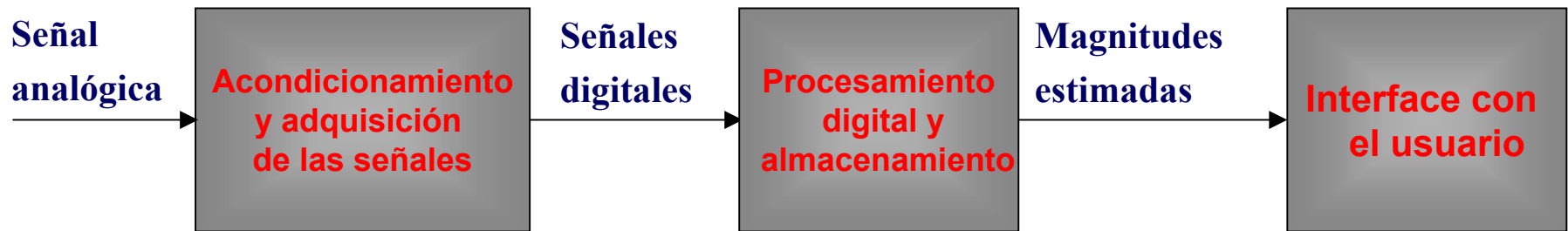
Sistemas de medición: monitorización de un sistema eléctrico



Sistemas de medición: sistema basado en conocimiento



Sistemas de medición: adquisición y procesamiento de las señales



Sistemas de medición: adquisición y procesamiento de las señales



Requerimientos básicos del subsistema de adquisición de las señales:

- Frecuencia de muestreo
- Rango dinámico de la señal de entrada
- Resolución

Otros factores a tener en cuenta:

- Filtros antisolapamiento
- La susceptibilidad a la interferencia electromagnética
- Canales de adquisición modulares
- Sincronización de los diferentes canales
- Escalado automático
- Calibración automática



Sistemas de medición: adquisición y procesamiento de las señales



Requerimientos del subsistema de procesamiento digital y almacenamiento

- Arquitectura del sistema
- Arquitectura de la memoria
- Capacidad de procesamiento
- Modularidad y procesamiento múltiple
- Capacidad de almacenamiento
- Diferentes algoritmos de procesamiento
- Operación del sistema en tiempo real
- Normalización industrial



Sistemas de medición: adquisición y procesamiento de las señales



Algoritmos de procesamiento

- Análisis de Fourier
- Transformada Wavelet
- Mínimos cuadrados recursivos (RLS)
- Mínimos cuadrados ordinarios (OLS)
- Transformada Hartley
- Transformada Walsh
- Filtro de Kalman
- Representación bilineal



Sistemas de medición: adquisición y procesamiento de las señales

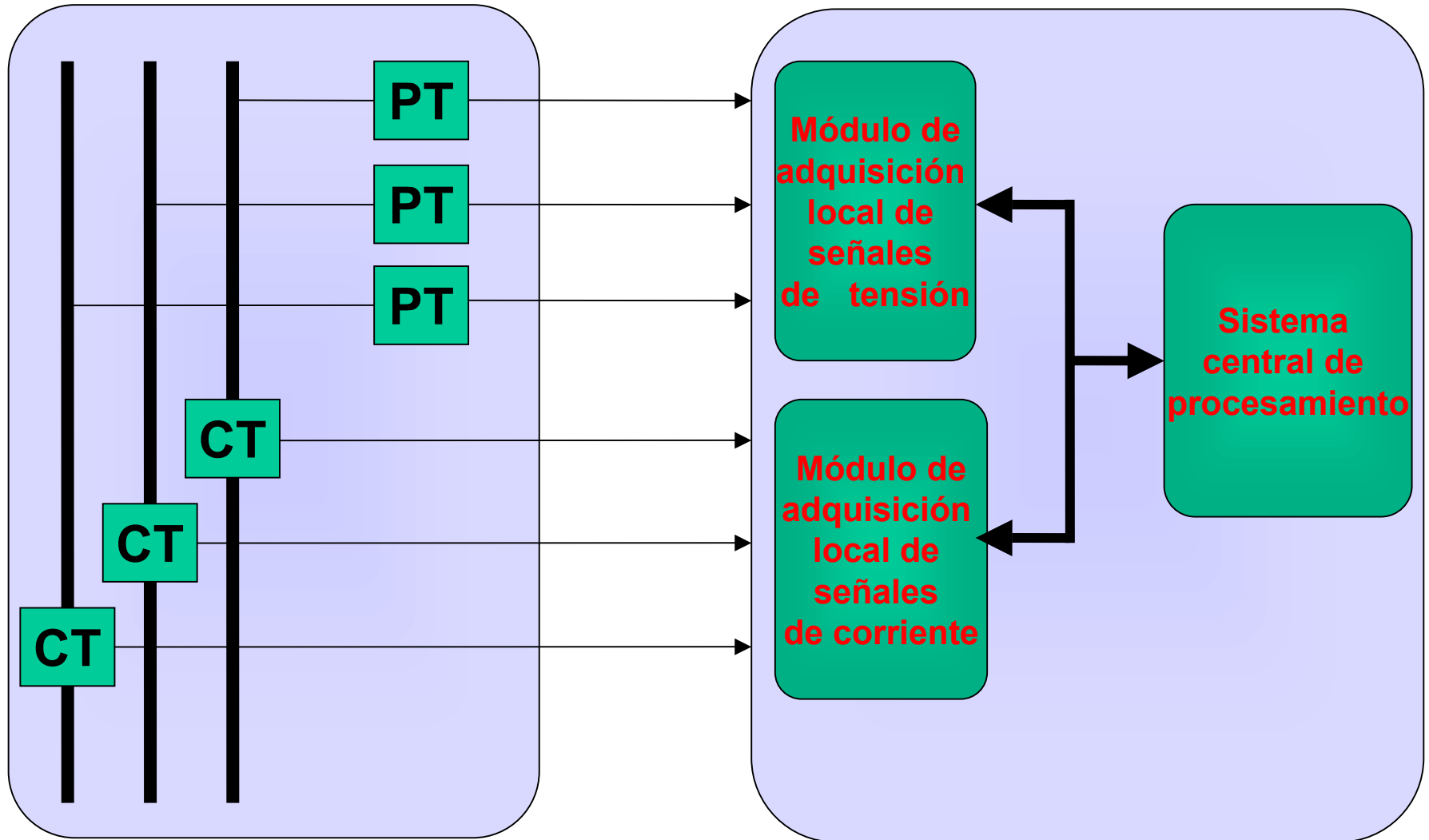


Requerimientos del subsistema de interface con el usuario

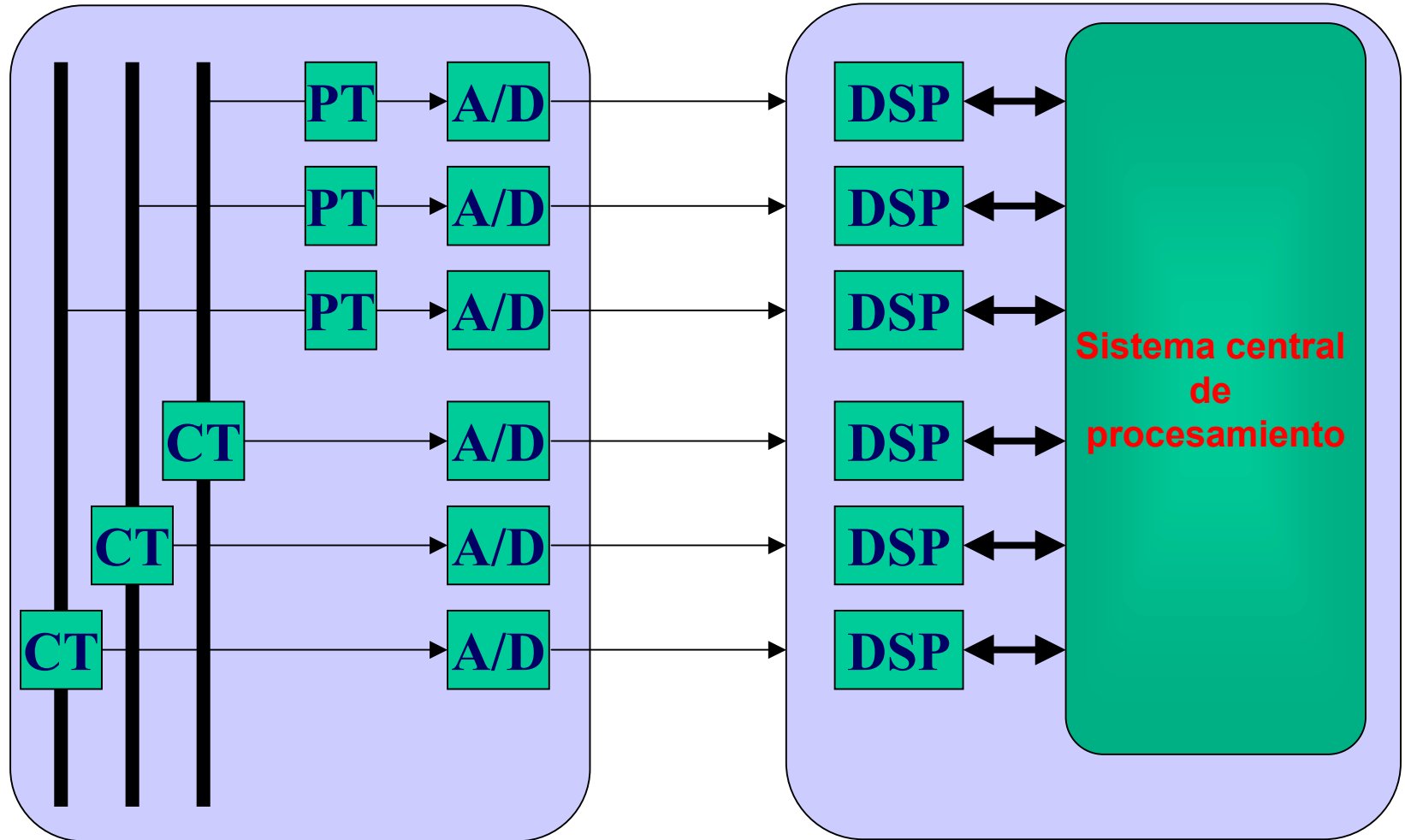
- Interface gráfica
- Presentación de las magnitudes estimadas
- Control integrado
- Monitorización y control remoto
- Interface con software comercial para reportes
- Lectura y análisis de los datos almacenados



Sistemas de medición: diseño de *hardware* (arquitectura centralizada)



Sistemas de medición: diseño de *hardware* (arquitectura distribuida)



Sistemas de medición: otros aspectos a tener en cuenta



- **Diseño del software**
 - ✓ Sistemas flexibles
 - ✓ Sistema virtual de operación
- **Sincronización del proceso de muestreo con múltiples canales**
 - ✓ Sincronización con un único sistema de monitorización
 - ✓ Sincronización de sistemas de monitorización separados geográficamente
- **Transmisión de datos**



Monitorización de transitorios y eventos: estimación de transitorios



- Sirve para comparar las magnitudes de las cantidades eléctricas con las que puede soportar los sistemas eléctricos y electrónicos
- Se detectan por la elevación imprevista de la tensión por encima de los niveles normales del sistema
- Es necesario diferenciarlos de armónicos de frecuencia alta (kHz)

Técnicas utilizadas:

- ✓ Algoritmo de ajuste de curva (CFA): Mínimos cuadrados recursivos
- ✓ Algoritmos que detectan la variación del cuadrado de la magnitud de la tensión
- ✓ La Transformada Wavelet



Monitorización de transitorios y eventos: Transformada Wavelet



➤ Algunas familias de Wavelet

Haar

Daubechies

Biorthogonal

Coiflets

Symlets

Morlet

Mexican Hat

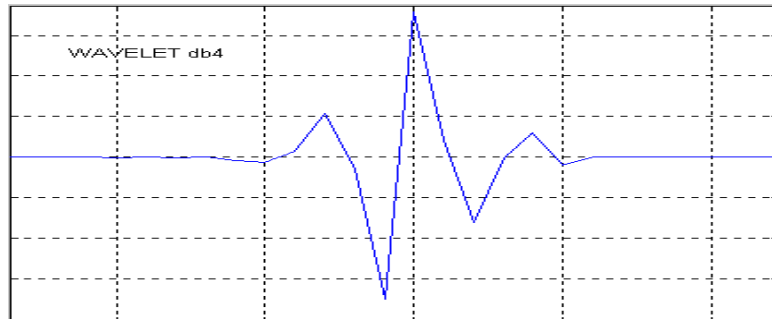
Meyer

➤ Wavelets mas utilizadas para análisis de transitorios

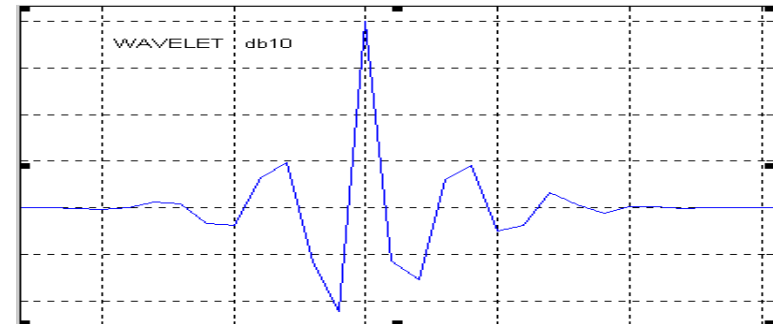
- ✓ db4 y db6: para transitorios rápidos de corta duración
- ✓ db8 y db10: para transitorios lentos



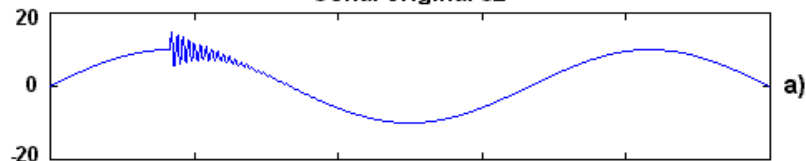
Monitorización de transitorios y eventos: Transformada Wavelet



Señal original s2



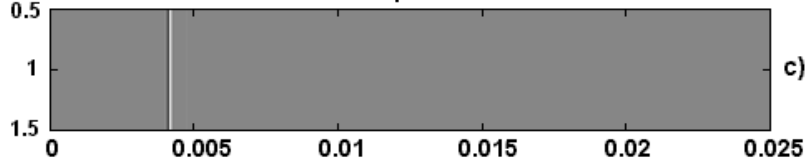
Señal original s1



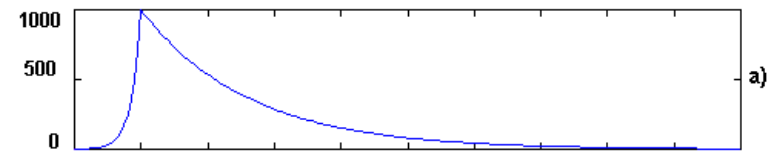
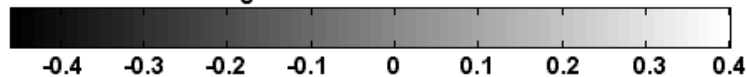
WTCs para db4



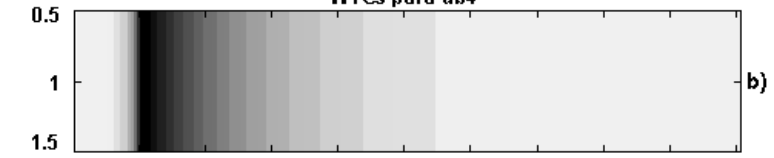
WTCs para db10



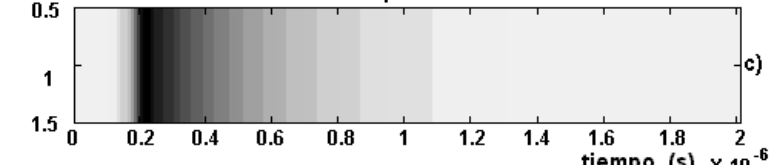
Magnitud de los WTCs escalado tiempo (seg)



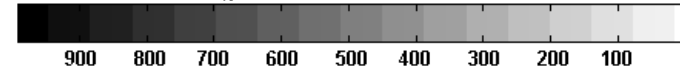
WTCs para db4



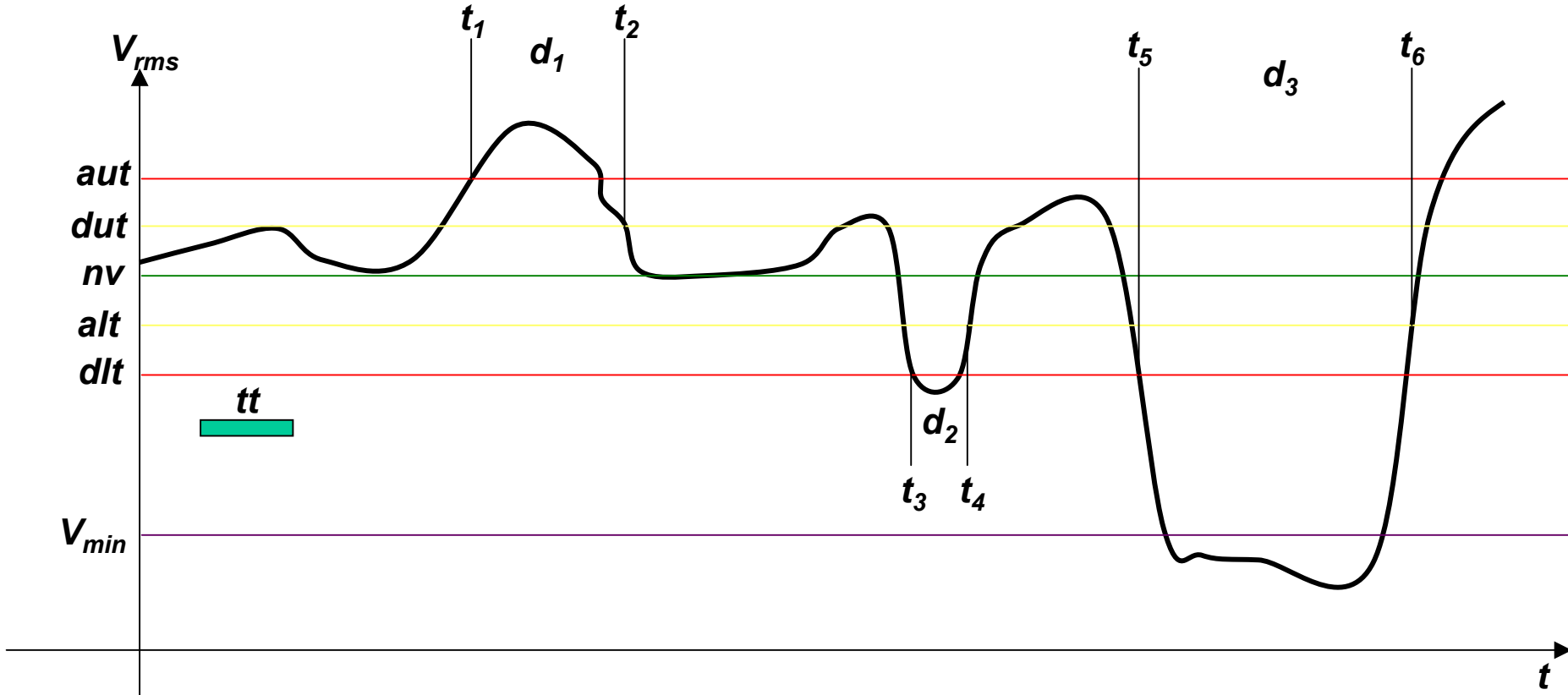
WTCs para db10



Magnitud de los WTCs escalada tiempo (s) $\times 10^{-6}$



Monitorización de transitorios y eventos: detección y registro de eventos



aut: límite superior ascendente
nv: valor nominal
dlt: límite inferior descendente

dut: límite superior descendente
alt: límite inferior ascendente
tt: tiempo límite del evento



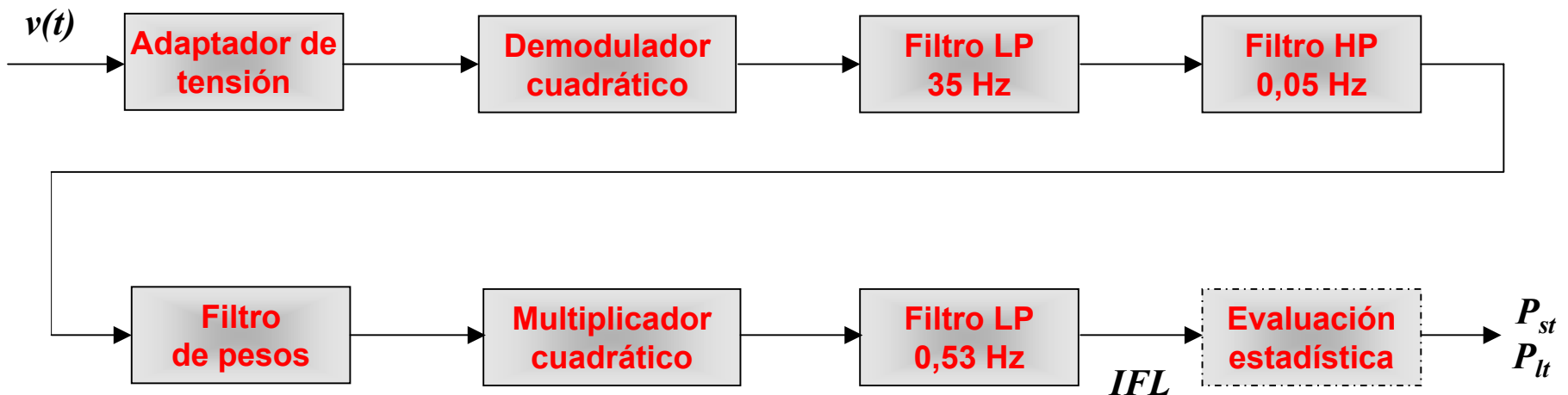


Monitorización de fluctuaciones

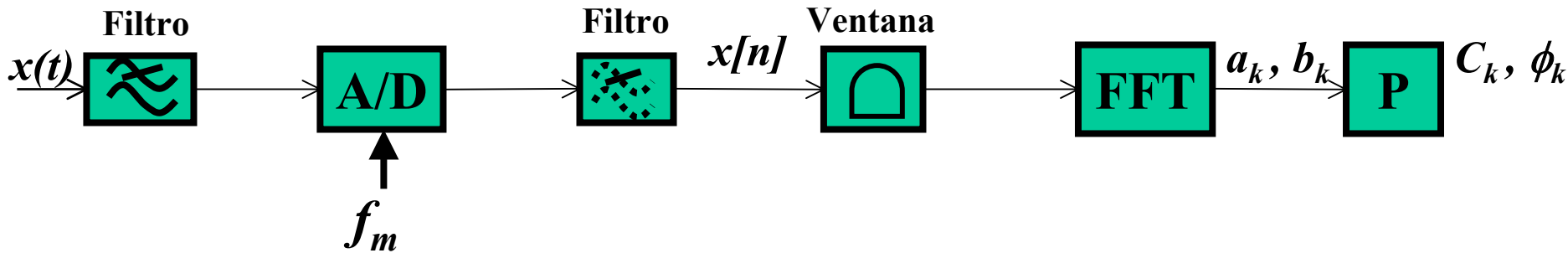
Diagrama de bloques de un medidor de *Flicker*



Diagrama de bloques de un medidor de *Flicker* analógico

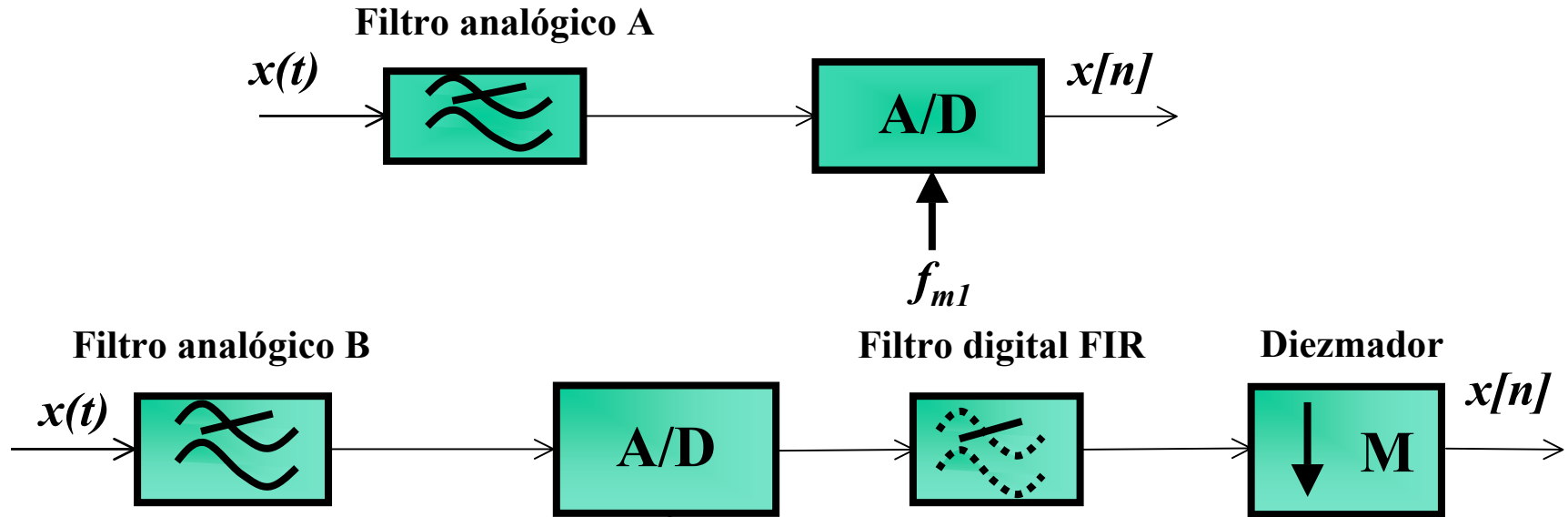


Monitorización del estado estacionario: estimación de armónicos



$$C_k = \text{Mod} [F[k]] = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$
$$\phi_k = \text{Arg} [F[k]] = \tan^{-1} \left(\frac{b_k}{a_k} \right)$$

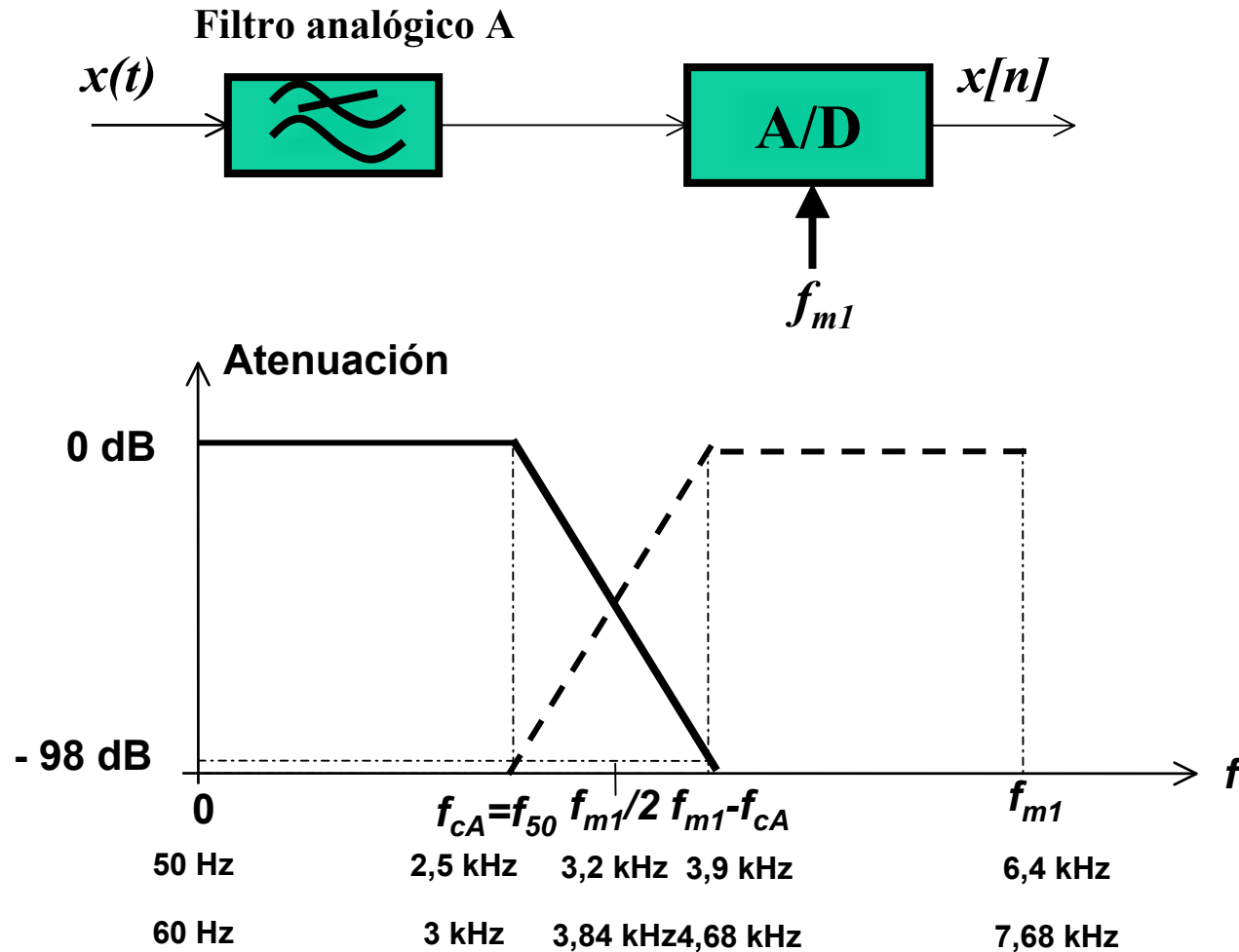
Monitorización del estado estacionario: filtros antisolapamiento



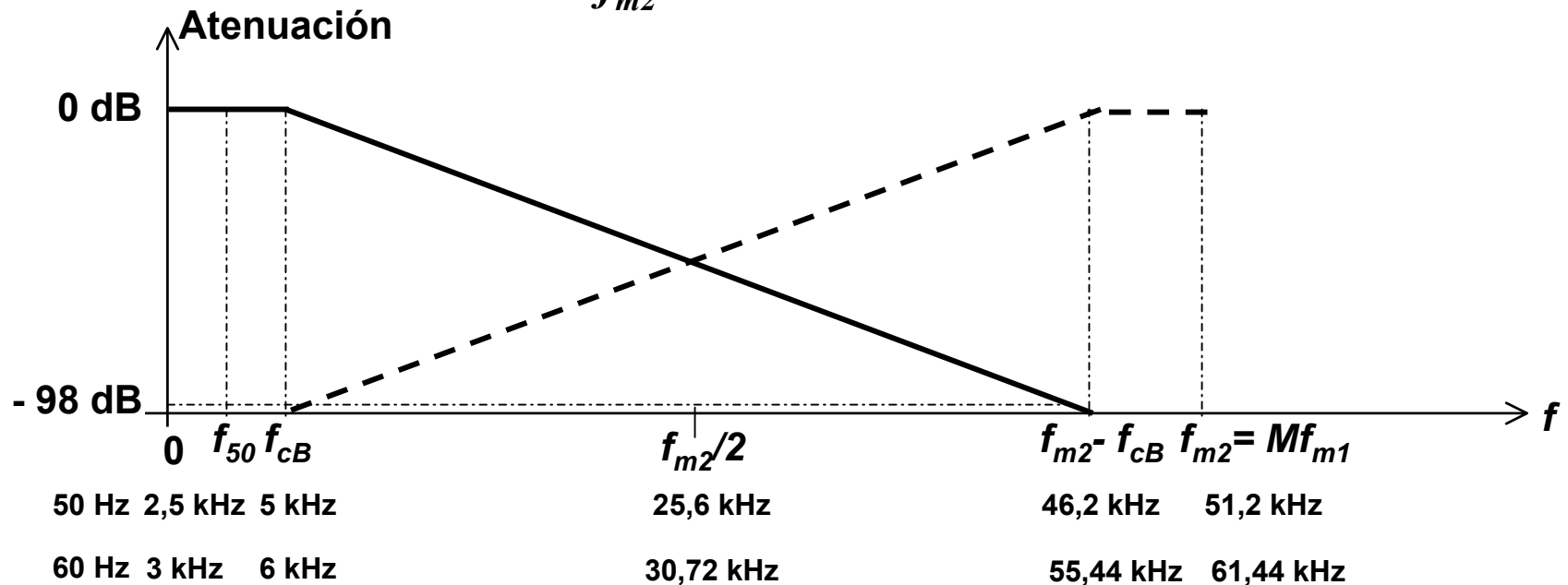
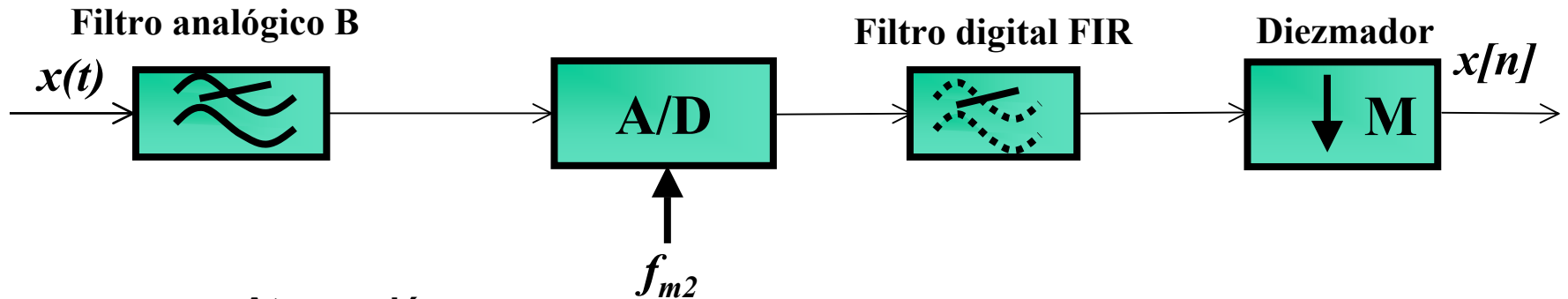
$$f_{m2} = M f_{m1}$$

$$f_{cB} > f_{cA}$$

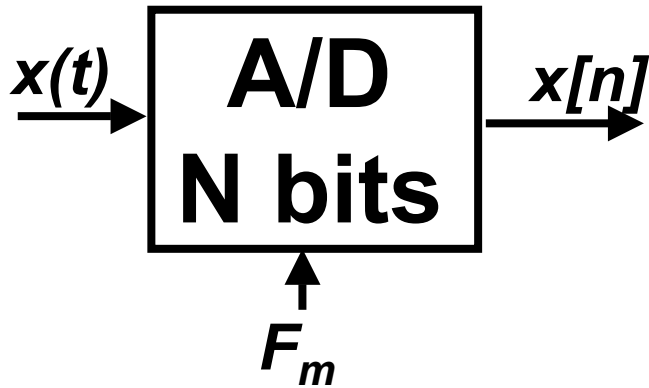
Monitorización del estado estacionario: filtros antisolapamiento sin sobremuestreo



Monitorización del estado estacionario: filtros antisolapamiento con sobremuestreo



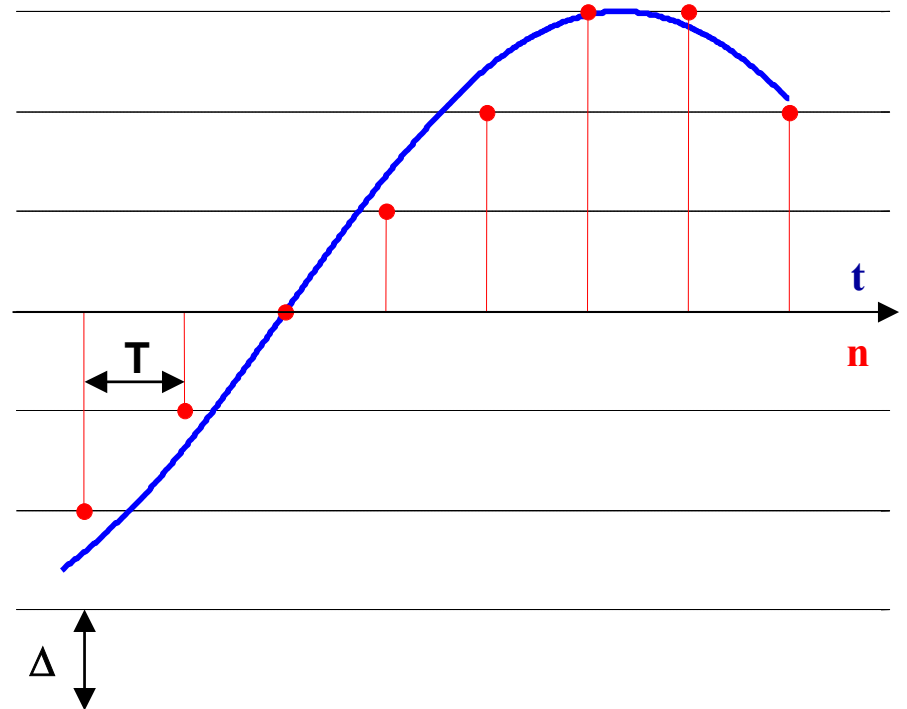
Monitorización del estado estacionario: conversión A/D - cuantificación



$$X_q[n] = Q\{x(nT)\}$$

$$e[n] = x(nT) - X_q[n]$$

$$|e[n]| \leq \Delta/2$$



$$SNR_{dB} = 10 \text{Log} (SNR) = 4,77 + 6,02N - 20 \text{Log} f_c$$

Monitorización del estado estacionario: Conversión A/D: Relación señal – ruido SNR



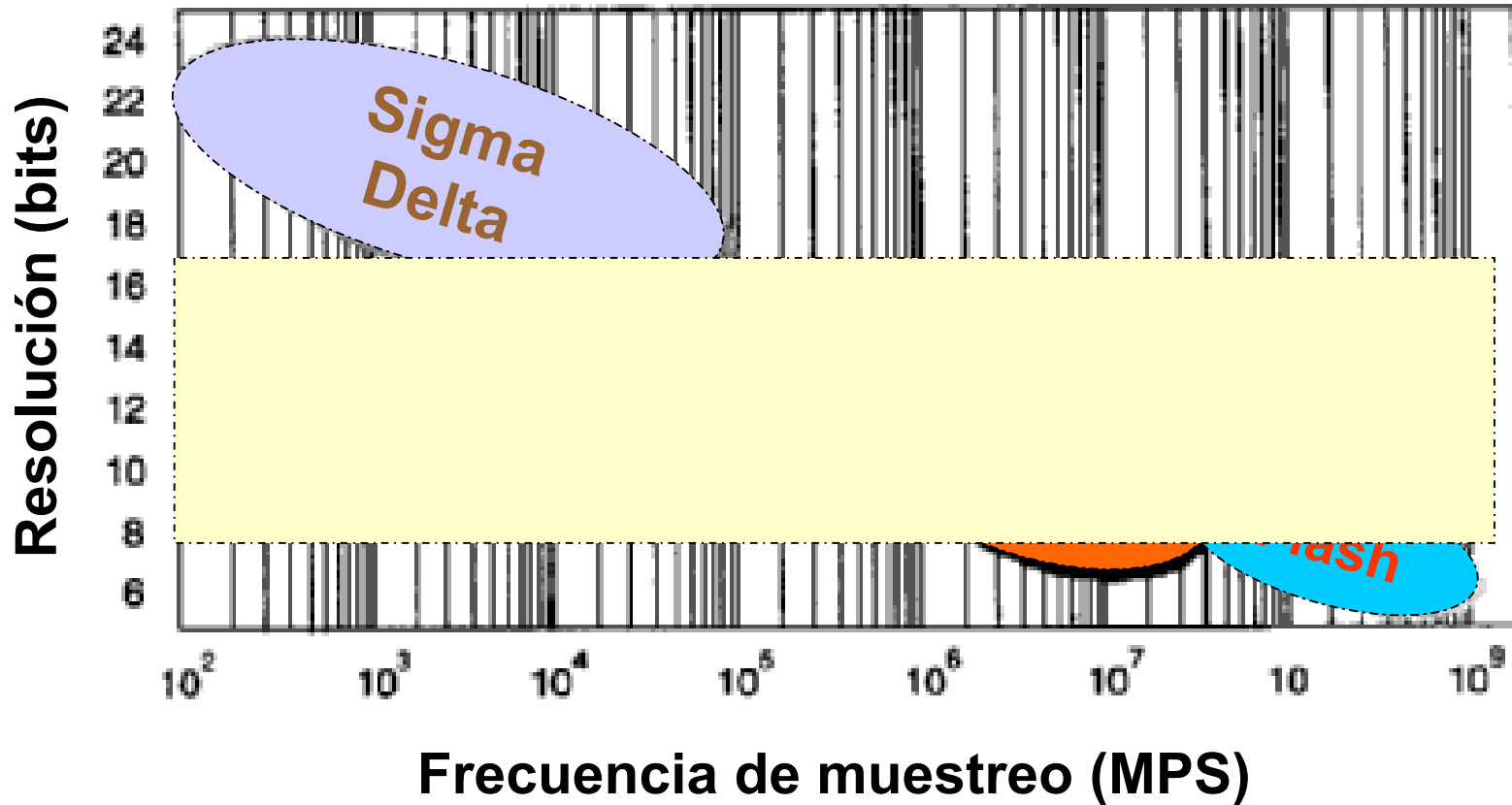
Relación SNR _{dB} para diferentes convertidores A/D y magnitudes de la señal						
Bits del convertidor	8	10	12	14	16	
Magnitud de la señal						
V_{\max}	49,9	62	74	86	98	
$1/2V_{\max}$	43,9	55,9	68	80	92,1	
$1/4V_{\max}$	37,9	49,9	62	74	86	
$1/8V_{\max}$	31,9	43,9	55,9	68	80	
$1/16V_{\max}$	25,8	37,9	49,9	62	74	
$1/32V_{\max}$	19,8	31,9	43,9	55,9	68	
$1/64V_{\max}$	13,8	25,8	37,9	49,9	62	



Monitorización del estado estacionario: técnicas de conversión ADC



Resolución vs Frecuencia de muestreo



Monitorización del estado estacionario: Transformada Discreta de Fourier (DFT)



Ecuaciones Básicas:

$$F[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}$$
$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F[k] e^{j \frac{2\pi kn}{N}}$$

Valor eficaz y ángulo de fase del armónico k

$$\sqrt{2} X_k = \frac{2}{N} \text{Mod}[F[k]] \quad \varphi_k = \text{Arg}[F[k]]$$

Valor eficaz y ángulo de fase para $k = 0$ y $k = N/2$

$$X_0 = \frac{1}{N} F[0] \quad X_{N/2} = \frac{1}{N} F[N/2]$$

DFT como filtro:
$$\sum_{n=0}^{N-1} \left[\left(x[n] - X_1 \cos\left(\frac{2\pi}{N} n + \varphi_1\right) \right)^2 \right]$$

