

Práctica Aplicada

Análisis de Calidad de Potencia

Itinerario de Eléctrica

Prof. Dr. Ing. Francisco Gil Montoya

Universidad de Almería
Primer Semestre
Curso Académico 2025-2026

Contents

1	Introducción	2
1.1	¿Qué aprenderás?	2
2	Práctica 1: Análisis en Dominio del Tiempo	2
2.1	Conceptos Básicos	2
2.2	Ejercicios Prácticos	2
2.2.1	Ejercicio 1.1: Cálculo del Valor RMS	2
2.2.2	Ejercicio 1.2: Detección de Cruces por Cero	3
2.2.3	Ejercicio 1.3: Detección de Variaciones de Tensión	3
2.3	Actividad Guiada: Analizar un Hueco de Tensión	4
3	Práctica 2: Análisis en Dominio de Frecuencia	4
3.1	Conceptos Básicos	5
3.2	Distorsión Armónica Total (THD)	5
3.3	Ejercicios Prácticos	5
3.3.1	Ejercicio 2.1: Análisis Espectral Básico	5
3.3.2	Ejercicio 2.2: Análisis de Armónicos	6
3.3.3	Ejercicio 2.3: Generar y Analizar Señal con Armónicos	6
3.4	Actividad Guiada: Comparar Diferentes Cargas	7
4	Ejercicios de Evaluación por Grupos	7
4.1	Grupo 1: Arranque de Motor Industrial	7
4.2	Grupo 2: Variador de Frecuencia en Sistema HVAC	8
4.3	Grupo 3: Sobretensión por Conmutación de Condensadores	9
4.4	Grupo 4: Cargas de Soldadura por Arco	9
4.5	Grupo 5: Microcortes en Data Center	10
4.6	Grupo 6: Sistema Fotovoltaico con Inversores	10
4.7	Grupo 7: Fallo Temporal en Transformador	11
4.8	Grupo 8: Cargadores de Vehículos Eléctricos	11
4.9	Grupo 9: Fluctuaciones por Horno de Arco	12
4.10	Grupo 10: Conmutación de Grandes Cargas	12
4.11	Formato de Entrega para Todos los Grupos	13
5	Apéndice: Guía para Generación de Señales	13
5.1	Generación de Señal Básica	13
5.2	Señal con Hueco de Tensión	13
5.3	Señal con Sobretensión	14
5.4	Señal con Múltiples Armónicos	14
5.5	Conversión de Índices de Tiempo	14
5.6	Consideraciones Importantes	15
6	Referencias	15

1 Introducción

La calidad de potencia es fundamental en los sistemas eléctricos modernos. En estas prácticas aprenderás a analizar señales eléctricas para detectar problemas comunes como armónicos, variaciones de tensión y perturbaciones.

1.1 ¿Qué aprenderás?

- Analizar señales eléctricas en el dominio del tiempo
- Calcular parámetros básicos (RMS, picos, frecuencia)
- Detectar armónicos usando análisis en frecuencia
- Utilizar MATLAB para procesamiento de señales

2 Práctica 1: Análisis en Dominio del Tiempo

★ Objetivo

Aprender a analizar señales eléctricas directamente observando su forma de onda y calculando parámetros básicos.

2.1 Conceptos Básicos

En el dominio del tiempo trabajamos directamente con la señal tal como varía con el tiempo. Los parámetros más importantes son:

- **Valor RMS:** Es el valor efectivo de la tensión o corriente. Para una señal sinusoidal pura, $V_{RMS} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}}$
- **Valor Pico:** Es el valor máximo que alcanza la señal
- **Frecuencia:** Número de ciclos por segundo (Hz). En España es 50 Hz
- **Cruces por Cero:** Puntos donde la señal cruza el valor cero

2.2 Ejercicios Prácticos

2.2.1 Ejercicio 1.1: Cálculo del Valor RMS

Tarea: Implementa una función en MATLAB que calcule el valor RMS de una señal.

Especificaciones:

- La función debe recibir como entrada un vector con los valores de la señal
- Debe devolver el valor RMS calculado
- Recuerda la fórmula: $V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2}$

Prueba:

- Genera una señal sinusoidal de 50 Hz con voltaje pico de 325 V
- Frecuencia de muestreo: 1000 Hz

- Duración: 100 ms (0.1 segundos)
- Compara tu resultado con el valor teórico: 230 V
- El error debe ser menor al 1%

2.2.2 Ejercicio 1.2: Detección de Cruces por Cero

Tarea: Implementa una función que detecte los cruces por cero de una señal.

Especificaciones:

- La función debe identificar los índices donde la señal cruza por cero
- Utiliza la función `sign()` para detectar cambios de signo
- Calcula la frecuencia de la señal usando el tiempo entre cruces consecutivos
- Considera que dos cruces consecutivos representan medio ciclo

Visualización requerida:

- Gráfica de la señal temporal
- Marca los puntos de cruce por cero con círculos rojos
- Incluye título, etiquetas de ejes y leyenda
- Muestra la frecuencia detectada en el título o como texto

2.2.3 Ejercicio 1.3: Detección de Variaciones de Tensión

Tarea: Calcula el valor RMS en ventanas móviles (deslizantes) para detectar huecos o sobreten-
siones.

Especificaciones:

- Implementa una función que calcule el RMS en ventanas deslizantes
- Parámetros de entrada: señal, frecuencia de muestreo, tamaño de ventana en ms
- La ventana debe desplazarse muestra a muestra
- Devuelve: vector de valores RMS y vector de tiempos correspondientes

► Consejo

Para la red española (230V, 50Hz), un ciclo completo dura 20 ms. Una ventana de 20 ms (un ciclo) es adecuada para detectar variaciones rápidas. Ventanas más pequeñas dan mayor resolución temporal pero más ruido.

2.3 Actividad Guiada: Analizar un Hueco de Tensión

Objetivo: Generar y analizar una señal con un hueco de tensión típico.

Pasos a seguir:

1. Generar la señal base:

- Frecuencia de muestreo: 2000 Hz
- Duración total: 200 ms
- Señal sinusoidal de 50 Hz, amplitud pico 325 V

2. Introducir el hueco:

- Inicio del hueco: 50 ms
- Duración del hueco: 50 ms (2.5 ciclos)
- Profundidad: 50% (reducir la amplitud a la mitad)

3. Calcular RMS deslizando:

- Usar ventana de 20 ms (un ciclo)
- Aplicar tu función del ejercicio 1.3

4. Visualizar resultados:

- Gráfica superior: señal temporal completa
- Gráfica inferior: valor RMS deslizando
- Incluir líneas de referencia: nominal (230V) y límite -10% (207V)
- Usar diferentes colores para mejor visualización

Preguntas de análisis:

1. ¿En qué momento se detecta el inicio del hueco?
2. ¿Cuál es el valor RMS mínimo alcanzado?
3. ¿Cuánto tarda la señal en volver al valor nominal?
4. ¿El hueco supera el límite del -10%? ¿Por cuánto tiempo?

3 Práctica 2: Análisis en Dominio de Frecuencia

★ Objetivo

Aprender a identificar y cuantificar armónicos en señales eléctricas usando la Transformada de Fourier.

3.1 Conceptos Básicos

Los **armónicos** son componentes de frecuencia múltiplos de la frecuencia fundamental (50 Hz):

- 1º armónico (fundamental): 50 Hz
- 3º armónico: 150 Hz
- 5º armónico: 250 Hz
- 7º armónico: 350 Hz
- etc.

Los armónicos impares (3º, 5º, 7º) son los más comunes en sistemas eléctricos y suelen ser causados por cargas no lineales (rectificadores, variadores de velocidad, etc.).

3.2 Distorsión Armónica Total (THD)

El THD es un indicador clave de la calidad de la forma de onda:

$$THD = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}$$

donde V_1 es la amplitud del armónico fundamental y V_n son las amplitudes de los armónicos superiores.

► Consejo

Según las normas, el THD de tensión no debe superar el 8% en redes de baja tensión. Valores más altos pueden causar problemas en equipos sensibles.

3.3 Ejercicios Prácticos

3.3.1 Ejercicio 2.1: Análisis Espectral Básico

Tarea: Implementa una función para calcular el espectro de frecuencias usando la FFT.

Especificaciones:

- Entrada: señal temporal y frecuencia de muestreo
- Salida: vector de frecuencias y magnitudes correspondientes
- Utiliza la función `fft()` de MATLAB
- Considera solo las frecuencias positivas (primera mitad del espectro)
- Normaliza las magnitudes dividiendo por el número de muestras
- Multiplica por 2 las componentes intermedias (excepto DC y Nyquist)

Prueba:

- Genera una señal sinusoidal pura de 50 Hz
- Frecuencia de muestreo: 2000 Hz, duración: 1 segundo
- Amplitud pico: 325 V
- Visualiza el espectro hasta 500 Hz usando `stem()`
- Verifica que aparece un pico solo en 50 Hz

3.3.2 Ejercicio 2.2: Análisis de Armónicos

Tarea: Crea una función para identificar y cuantificar armónicos específicos.

Especificaciones:

- Entrada: señal, frecuencia de muestreo, frecuencia fundamental (50 Hz)
- Analizar los primeros 15 armónicos
- Para cada armónico n , buscar el pico en la frecuencia $n \times f_0$
- Guardar: número de armónico, frecuencia exacta, magnitud
- Calcular el THD usando la fórmula proporcionada

Consideraciones importantes:

- La resolución de frecuencia es $\Delta f = f_s/N$
- Busca el índice más cercano a cada frecuencia armónica
- El fundamental es el armónico 1 (50 Hz)

3.3.3 Ejercicio 2.3: Generar y Analizar Señal con Armónicos

Tarea: Genera una señal compuesta y analiza su contenido armónico.

Parámetros de la señal:

- Fundamental (50 Hz): 325 V
- 3er armónico (150 Hz): 15% del fundamental (48.75 V)
- 5to armónico (250 Hz): 10% del fundamental (32.5 V)
- Frecuencia de muestreo: 2000 Hz
- Duración: 0.5 segundos

Visualización requerida:

1. **Gráfica superior:** Señal temporal (primeros 4 ciclos)

- Observa la distorsión de la forma de onda
- Etiqueta: Tiempo (ms) vs Voltaje (V)

2. **Gráfica inferior:** Espectro de armónicos

- Gráfica de barras de los primeros 10 armónicos
- Etiqueta: Número de Armónico vs Magnitud (V)

Análisis requerido:

- Mostrar tabla con: número de armónico, magnitud (V), porcentaje respecto al fundamental
- Calcular y mostrar el THD
- Comparar con el THD teórico esperado: $\sqrt{0.15^2 + 0.10^2} \times 100 = 18\%$

3.4 Actividad Guiada: Comparar Diferentes Cargas

Objetivo: Simular y comparar el contenido armónico de tres tipos de cargas.

Cargas a simular:

1. **Carga Lineal (ideal):**

- Solo fundamental de 50 Hz
- Amplitud: 325 V
- THD esperado: $\approx 0\%$

2. **Carga con Distorsión Moderada:**

- Fundamental: 325 V
- 3er armónico: 10% (32.5 V)
- 5to armónico: 5% (16.25 V)
- THD esperado: $\approx 11.2\%$

3. **Carga Altamente Distorsionada:**

- Fundamental: 325 V
- 3er armónico: 25% (81.25 V)
- 5to armónico: 15% (48.75 V)
- 7mo armónico: 10% (32.5 V)
- THD esperado: $\approx 30.4\%$

Tareas:

1. Generar las tres señales con los parámetros indicados
2. Aplicar tu función de análisis de armónicos a cada una
3. Crear una tabla comparativa con los resultados
4. Visualizar los espectros de las tres señales en subplots
5. Analizar: ¿Cuál carga superaría el límite normativo del 8%?

4 Ejercicios de Evaluación por Grupos

Cada grupo deberá realizar el ejercicio correspondiente a su número de grupo. Los ejercicios están diseñados para evaluar la comprensión de los conceptos y la capacidad de análisis de diferentes escenarios reales de calidad de potencia.

4.1 Grupo 1: Arranque de Motor Industrial

Escenario: Una fábrica experimenta caídas de tensión cada vez que arranca un motor trifásico de gran potencia.

Especificaciones de la señal:

- Duración total: 500 ms

- Tensión nominal: 325 V pico (230 V RMS)
- Evento: Hueco de tensión del 35% durante 150 ms
- Inicio del hueco: en $t = 100$ ms
- Frecuencia: 50 Hz

Tareas:

1. Generar la señal con las características especificadas
2. Calcular y graficar el RMS deslizante (ventana de 20 ms)
3. Determinar:
 - Duración exacta del hueco
 - Valor RMS mínimo alcanzado
 - Tiempo de recuperación
 - ¿Cumple con la norma IEC 61000-2-2? (límite: -10% durante 1 segundo)
4. Proponer dos soluciones técnicas para mitigar este problema

4.2 Grupo 2: Variador de Frecuencia en Sistema HVAC

Escenario: Un sistema de climatización con variadores de frecuencia introduce armónicos en la instalación.

Especificaciones de la señal:

- Duración: 1 segundo
- Fundamental (50 Hz): 325 V
- Armónicos presentes:
 - 5º armónico: 18% del fundamental
 - 7º armónico: 12% del fundamental
 - 11º armónico: 7% del fundamental

Tareas:

1. Generar la señal compuesta
2. Calcular el espectro de frecuencias
3. Determinar el THD y comparar con el límite del 8%
4. Analizar qué porcentaje de la distorsión aporta cada armónico
5. Proponer filtros pasivos o activos para reducir los armónicos principales

4.3 Grupo 3: Sobretensión por Conmutación de Condensadores

Escenario: La conexión de un banco de condensadores causa sobretensiones transitorias.

Especificaciones de la señal:

- Duración total: 400 ms
- Tensión nominal: 325 V pico
- Evento: Sobretensión del 25% durante 80 ms
- Inicio: en $t = 150$ ms
- Frecuencia: 50 Hz

Tareas:

1. Generar la señal con sobretensión
2. Calcular RMS deslizante con ventanas de 10 ms y 20 ms
3. Comparar los resultados con ambos tamaños de ventana
4. Determinar cuál ventana detecta mejor el evento y por qué
5. Analizar el impacto potencial en equipos electrónicos sensibles
6. Proponer medidas correctivas

4.4 Grupo 4: Cargas de Soldadura por Arco

Escenario: Equipos de soldadura causan flicker y armónicos en una nave industrial.

Especificaciones de la señal:

- Duración: 1 segundo
- Fundamental (50 Hz): 325 V
- Armónicos:
 - 3º armónico: 22% del fundamental
 - 5º armónico: 15% del fundamental
 - 7º armónico: 9% del fundamental
 - 9º armónico: 5% del fundamental

Tareas:

1. Generar y analizar la señal
2. Calcular el THD total
3. Calcular el THD considerando solo armónicos impares hasta el 7º
4. Comparar ambos valores y analizar la diferencia
5. Diseñar conceptualmente un filtro sintonizado para el 3º armónico
6. Estimar la mejora esperada en el THD

4.5 Grupo 5: Microcortes en Data Center

Escenario: Un centro de datos experimenta microcortes que afectan a equipos críticos.

Especificaciones de la señal:

- Duración total: 300 ms
- Tensión nominal: 325 V pico
- Eventos:
 - Microcorte 1: Hueco del 80% durante 15 ms (inicio: 50 ms)
 - Microcorte 2: Hueco del 70% durante 20 ms (inicio: 150 ms)

Tareas:

1. Generar la señal con ambos microcortes
2. Calcular RMS deslizante (ventana: 10 ms)
3. Identificar y caracterizar ambos eventos
4. Clasificar los huecos según la norma IEC 61000-4-11
5. Determinar si un UPS con tiempo de conmutación de 4 ms protegería adecuadamente
6. Justificar la respuesta con datos del análisis

4.6 Grupo 6: Sistema Fotovoltaico con Inversores

Escenario: Una instalación fotovoltaica con múltiples inversores introduce distorsión armónica.

Especificaciones de la señal:

- Duración: 1 segundo
- Fundamental (50 Hz): 325 V
- Armónicos característicos de inversores:
 - 3º armónico: 5% del fundamental
 - 5º armónico: 8% del fundamental
 - 7º armónico: 6% del fundamental
 - 11º armónico: 4% del fundamental
 - 13º armónico: 3% del fundamental

Tareas:

1. Generar y analizar la señal
2. Calcular el THD y verificar cumplimiento normativo
3. Identificar los tres armónicos más significativos
4. Analizar si cumple con el estándar IEEE 519
5. Proponer configuración de filtrado para reducir el THD por debajo del 5%
6. Calcular el THD esperado tras el filtrado propuesto

4.7 Grupo 7: Fallo Temporal en Transformador

Escenario: Un transformador de distribución sufre un fallo temporal que causa variaciones de tensión.

Especificaciones de la señal:

- Duración total: 600 ms
- Tensión nominal: 325 V pico
- Eventos:
 - Hueco inicial: 45% durante 100 ms (inicio: 50 ms)
 - Sobretensión de recuperación: 15% durante 120 ms (tras el hueco)
 - Retorno a nominal

Tareas:

1. Generar la señal con ambos eventos consecutivos
2. Calcular RMS deslizante (ventana: 20 ms)
3. Identificar claramente las tres fases del evento
4. Medir duraciones y magnitudes de cada fase
5. Analizar el riesgo para equipos conectados en cada fase
6. Proponer sistemas de protección adecuados

4.8 Grupo 8: Cargadores de Vehículos Eléctricos

Escenario: Una estación de carga rápida para vehículos eléctricos genera armónicos de alta frecuencia.

Especificaciones de la señal:

- Duración: 1 segundo
- Fundamental (50 Hz): 325 V
- Armónicos:
 - 5º armónico: 12% del fundamental
 - 7º armónico: 10% del fundamental
 - 11º armónico: 8% del fundamental
 - 13º armónico: 6% del fundamental
 - 17º armónico: 4% del fundamental

Tareas:

1. Generar y analizar la señal completa
2. Calcular el THD considerando todos los armónicos
3. Calcular el THD considerando solo hasta el 13º armónico
4. Analizar la contribución de armónicos de orden superior
5. Evaluar cumplimiento con norma IEC 61851
6. Proponer soluciones técnicas específicas para cargadores EV

4.9 Grupo 9: Fluctuaciones por Horno de Arco

Escenario: Un horno de arco eléctrico causa fluctuaciones de tensión (flicker) y armónicos.

Especificaciones de la señal:

- Duración total: 500 ms
- Tensión base: 325 V pico
- Fluctuaciones:
 - 5 huecos del 20%, cada uno de 30 ms de duración
 - Espaciados cada 80 ms
 - Primer hueco en $t = 40$ ms
- Armónicos adicionales: 3^o (10%), 5^o (8%)

Tareas:

1. Generar señal con fluctuaciones periódicas y armónicos
2. Calcular RMS deslizante (ventana: 15 ms)
3. Analizar el patrón de repetición de las fluctuaciones
4. Calcular el contenido armónico
5. Evaluar el impacto en iluminación (flicker)
6. Proponer compensación dinámica mediante STATCOM

4.10 Grupo 10: Conmutación de Grandes Cargas

Escenario: La conexión y desconexión de grandes cargas industriales causa transitorios complejos.

Especificaciones de la señal:

- Duración total: 700 ms
- Tensión nominal: 325 V pico
- Eventos:
 - Conexión de carga: Hueco del 30%, 60 ms (inicio: 100 ms)
 - Período estable: 300 ms con armónicos 3^o (8%) y 5^o (5%)
 - Desconexión: Sobretenión del 20%, 50 ms

Tareas:

1. Generar señal completa con los tres eventos
2. Aplicar análisis en dominio del tiempo (RMS deslizante)
3. Aplicar análisis en dominio de frecuencia a la fase estable
4. Caracterizar completamente cada evento
5. Calcular THD durante la fase estable
6. Proponer secuencia de conexión/desconexión más suave
7. Diseñar protocolos de operación para minimizar impactos

4.11 Formato de Entrega para Todos los Grupos

Independientemente del grupo, todos los trabajos deben incluir:

1. **Código MATLAB:**

- Funciones implementadas (correctamente comentadas)
- Script principal de análisis
- Código para generación de gráficas

2. **Informe Técnico (máximo 10 páginas):**

- Introducción al problema específico
- Metodología de análisis empleada
- Resultados con gráficas claras y bien etiquetadas
- Análisis e interpretación de resultados
- Conclusiones y recomendaciones técnicas

3. **Gráficas Requeridas:**

- Señal temporal completa
- Zoom de los eventos más relevantes
- RMS deslizante (si aplica)
- Espectro de frecuencias (si aplica)
- Gráfico de barras de armónicos (si aplica)

5 Apéndice: Guía para Generación de Señales

5.1 Generación de Señal Básica

Para generar una señal sinusoidal básica en MATLAB:

Parámetros necesarios:

- **fs:** Frecuencia de muestreo (Hz) - recomendado: 1000-2000 Hz
- **t:** Vector de tiempo - usar `0:1/fs:duracion`
- **f:** Frecuencia de la señal (Hz) - típicamente 50 Hz
- **Vpico:** Amplitud pico (V) - 325 V para 230 V RMS

Fórmula: $v(t) = V_{pico} \cdot \sin(2\pi ft)$

5.2 Señal con Hueco de Tensión

Parámetros adicionales:

- **t_inicio:** Momento de inicio del hueco (segundos)
- **t_duracion:** Duración del hueco (segundos)
- **profundidad:** Factor de reducción (0-1)

- 0.5 = hueco del 50%
- 0.2 = hueco del 80%

Metodología:

1. Generar la señal base completa
2. Identificar los índices correspondientes al período del hueco
3. Multiplicar esos segmentos por el factor de profundidad

5.3 Señal con Sobretensión

Similar al hueco, pero multiplicar por un factor mayor que 1:

- 1.15 = sobretensión del 15%
- 1.25 = sobretensión del 25%

5.4 Señal con Múltiples Armónicos

Principio de superposición:

La señal resultante es la suma de múltiples componentes sinusoidales:

$$v(t) = \sum_{n=1}^N V_n \cdot \sin(2\pi \cdot n \cdot f_0 \cdot t)$$

donde:

- V_n : Amplitud del n-ésimo armónico
- f_0 : Frecuencia fundamental (50 Hz)
- n : Orden del armónico (1, 3, 5, 7, ...)

Ejemplo de composición:

- Fundamental: $V_1 = 325$ V
- 3º armónico: $V_3 = 0.15 \times V_1 = 48.75$ V
- 5º armónico: $V_5 = 0.10 \times V_1 = 32.5$ V

La señal final se obtiene sumando todas las componentes.

5.5 Conversión de Índices de Tiempo

Para trabajar con eventos en momentos específicos:

Convertir tiempo a índice:

$$\text{índice} = \text{round}(t \times fs)$$

Ejemplo:

- Evento en 50 ms con $fs = 2000$ Hz
- Índice = $\text{round}(0.05 \times 2000) = 100$

5.6 Consideraciones Importantes

- **Frecuencia de muestreo:** Debe ser al menos 40 veces la frecuencia fundamental (criterio de Nyquist mejorado para análisis de armónicos)
- **Duración de la señal:** Para análisis espectral preciso, usar al menos 10 ciclos completos de la fundamental
- **Resolución de frecuencia:** $\Delta f = f_s/N$, donde N es el número total de muestras
- **Ventana de análisis:** Para eventos transitorios, la ventana debe ser menor que la duración del evento pero mayor que un ciclo

6 Referencias

1. Norma IEEE 1159 - Monitoreo de Calidad de Potencia
2. Norma IEC 61000 - Compatibilidad Electromagnética
3. Documentación de MATLAB - Signal Processing Toolbox
4. Apuntes de la asignatura