

Análisis Matemático III

Javier Ortín Rodenas

Curso 2025-2026

Contenidos

IV Series de Fourier	3
1. Primeros conceptos	3
4.1.1 Definición de sistema ortonormal	3
4.1.2 Ejemplos de sistemas ortonormales	3
4.1.3 Teorema de óptima aproximación	4
4.1.4 Definición de coeficientes de Fourier	5
4.1.5 Unicidad de las Series de Fourier	6
4.1.6 Identidad de Parseval	7
4.1.7 Definición de sistema ortonormal completo	7
4.1.8 Ejemplo de sistema ortonormal completo	8
4.1.9 Ejemplo de cálculo de serie de Fourier	9
2. Estudio de la convergencia puntual	10
4.2.1 Teorema de Riesz-Fisher	10

IV Series de Fourier

Recordamos que $L_2(X, K) \equiv \frac{\mathcal{L}_2(X, K)}{\sim}$ es un espacio de Hilbert; donde X es un K -espacio vectorial, y $f \sim g \iff f \stackrel{\mu-a.e.}{=} g$. El producto interior y su norma asociada se definen como:

$$\langle f, g \rangle = \int_X \bar{f} \cdot g \qquad \|f\|_2 = \sqrt{\langle f, f \rangle}$$

Nótese que cuando trabajamos con \mathbb{C} como cuerpo el producto interno tiene linealidad directa en una componente, mientras que tiene linealidad por el conjugado en la otra. Asimismo, el producto interno da lugar a escalares del propio cuerpo sobre el que se define, luego podría dar lugar a valores complejos. Además, el producto interno no conmuta (en general) en \mathbb{C} .

La idea de esta unidad es “aproximar” una función $f \in L_2(X, K)$ como “suma” de funciones más elementales. En particular, a partir de ahora, consideraremos $X = I = [0, 2\pi]$, con $K = \mathbb{R}$ ó \mathbb{C} . Además, extenderemos las funciones en este conjunto con periodicidad 2π en \mathbb{R} .

§1. Primeros conceptos

4.1.1 Definición de sistema ortonormal

Dado un espacio de Hilbert V , un sistema ortonormal en V es un conjunto $\{\varphi_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subseteq V$ que verifica:

$$\langle \varphi_n, \varphi_m \rangle = \delta_{n,m} = \begin{cases} 1 & \text{si } n = m \\ 0 & \text{si } n \neq m \end{cases}$$

4.1.2 Ejemplos de sistemas ortonormales

i) $K = \mathbb{R}$, $V = L_2([0, 2\pi], \mathbb{R})$. Consideramos el siguiente sistema:

$$\varphi_0(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \qquad \varphi_{2n-1}(t) = \frac{\cos(nt)}{\sqrt{\pi}} \qquad \varphi_{2n}(t) = \frac{\sin(nt)}{\sqrt{\pi}}$$

Veamos que es ortonormal:

$$\int_0^{2\pi} \varphi_0^2(t) dt = \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi} dt = 1$$

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \varphi_{2n+1}^2(t) dt &= \int_0^{2\pi} \frac{\cos^2(nt)}{\pi} dt \stackrel{u=nt}{=} \frac{1}{n\pi} \int_0^{2n\pi} \frac{1 + \cos(2u)}{2} du \stackrel{v=2u}{=} \\ &= \frac{1}{4n\pi} \int_0^{4n\pi} 1 + \cos(v) = \frac{4n\pi}{4n\pi} + 0 = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \varphi_{2n}^2(t) dt &= \int_0^{2\pi} \frac{\sin^2(nt)}{\pi} dt \stackrel{u=nt}{=} \frac{1}{n\pi} \int_0^{2n\pi} \frac{1 - \cos(2u)}{2} du \stackrel{v=2u}{=} \\ &= \frac{1}{4n\pi} \int_0^{4n\pi} 1 - \cos(v) = \frac{4n\pi}{4n\pi} + 0 = 1 \end{aligned}$$

Por ser funciones con periodo 2π , para $n \in \mathbb{N}$ cualquiera, se cumple:

$$\int_0^{2\pi} \varphi_{2n+1}(t) dt = \int_0^{2\pi} \varphi_{2n}(t) dt = \int_0^{2\pi} \varphi_{2n+1}(t) \cdot \varphi_{2n}(t) dt = 0$$

Hemos demostrado que el sistema es ortonormal.

ii) Para $K = \mathbb{C}$, $V = L_2([0, 2\pi], \mathbb{C})$, el siguiente sistema es ortonormal:

$$\left\{ \varphi_n(t) = \frac{e^{i \cdot n \cdot t}}{\sqrt{\pi}} \right\}_{n \in \mathbb{N}}$$

4.1.3 Teorema de óptima aproximación

Sea V un K -espacio pre-Hilbert. Sea $\{\varphi_0, \dots, \varphi_n\} \subseteq V$ un sistema ortonormal finito en V . Sea $f \in V$. Si W es la clausura $K\langle \varphi_0, \dots, \varphi_n \rangle$. Entonces, el elemento de W que mejor aproxima f (en cuanto a minimizar la norma de su diferencia) es

$$s_n = \sum_{k=0}^n \underbrace{\langle f, \varphi_k \rangle}_{c_k} \varphi_k$$

Es decir, dado $t_n = \sum_{k=0}^n b_k \cdot \varphi_k \in W$ cualquiera (formado a partir de escalares cualesquiera), se cumple $\|f - s_n\| \leq \|f - t_n\|$.

Demostración:

Al ser un espacio Pre-Hilbert por hipótesis, tenemos que :

$$\begin{aligned} \|f - t_n\|^2 &= \langle f - t_n, f - t_n \rangle = \langle f, f \rangle - \langle f, t_n \rangle - \langle t_n, f \rangle + \langle t_n, t_n \rangle = \\ &= \|f\|^2 - \left\langle f, \sum_{k=0}^n b_k \varphi_k \right\rangle - \left\langle \sum_{k=0}^n b_k \varphi_k, f \right\rangle + \left\langle \sum_{k=0}^n b_k \varphi_k, \sum_{k=0}^n b_k \varphi_k \right\rangle = \begin{matrix} \text{linealidad} \\ \text{ortonormalidad} \end{matrix} \\ &= \|f\|^2 - \sum_{k=0}^n b_k \langle f, \varphi_k \rangle - \sum_{k=0}^n \bar{b}_k \langle f, \varphi_k \rangle + \sum_{k=0}^n \bar{b}_k \cdot b_k = \text{definición de } c_k \\ &= \|f\|^2 + \sum_{k=0}^n \left[-b_k c_k - \bar{b}_k c_k + |b_k|^2 \right] = (*) \end{aligned}$$

Comparamos ahora con la siguiente expresión:

$$|b_k - c_k|^2 = (b_k - c_k)(\bar{b}_k - \bar{c}_k) = b_k \bar{b}_k - b_k \bar{c}_k - \bar{b}_k c_k + c_k \bar{c}_k = |b_k|^2 + |c_k|^2 - b_k \bar{c}_k - \bar{b}_k c_k$$

Sustituyendo en la igualdad anterior,

$$(*) = \|f\|^2 + \sum_{k=0}^n \left[|b_k - c_k|^2 - |c_k|^2 \right]$$

En particular, para $b_k = c_k$ tenemos $\|f - s_n\|^2 \leq \|f - t_n\|^2$.

Motivados por este resultado, buscamos aproximar f por una “combinación lineal infinita” de funciones de un sistema ortonormal.

4.1.4 Definición de coeficientes de Fourier

Dada una función $f \in L_2([0, 2\pi])$, y un sistema ortonormal $\{\varphi_n\}_{n \in \mathbb{N}}$. Se denomina “coeficiente n -ésimo de Fourier de f respecto de $\{\varphi_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ ” al escalar:

$$c_n := \langle f, \varphi_n \rangle = \int_0^{2\pi} \bar{f}(t) \cdot \varphi_n(t) dt$$

Definimos la suma parcial n -ésima de Fourier de f respecto de $\{\varphi_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ como:

$$s_n(x) = \sum_{k=0}^n c_k \cdot \varphi_k(x)$$

Análogamente, la serie de Fourier de f respecto de $\{\varphi_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ viene dada por:

$$s(x) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot \varphi_k(x)$$

4.1.5 Unicidad de las Series de Fourier

Sea $f \in L_2(I, K)$. Sea $\{\varphi_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ un sistema ortonormal. La serie de Fourier de f respecto de $\{\varphi_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ está bien definida, pues existe un único elemento $s \in L_2(I, K)$ que verifica:

$$\|s - s_n\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

Demostración:

Sean p, q in \mathbb{N} cualesquiera. Supongamos sin pérdida de generalidad que $q > p$. Entonces,

$$\begin{aligned} \|s_p - s_q\|^2 &= \left\| \sum_{k=p+1}^q s_k \right\|^2 = \left\langle \sum_{k=p+1}^q \langle f, \varphi_k \rangle \varphi_k, \sum_{k=p+1}^q \langle f, \varphi_k \rangle \varphi_k \right\rangle \stackrel{\text{ortonormalidad}}{=} \\ &= \sum_{k=p+1}^q |\langle f, \varphi_k \rangle|^2 = |a_p - a_q|^2 \quad \text{donde } a_n = \sum_{k=0}^n |\langle f, \varphi_k \rangle|^2 \end{aligned}$$

Por el Teorema de óptima aproximación, para $n \in \mathbb{N}$ cualquiera tenemos que:

$$\|f - s_n\|^2 = \|f\|^2 - \underbrace{\sum_{k=0}^n |\langle f, \varphi_k \rangle|^2}_{a_n} = \|f\|^2 - a_n$$

Esto implica que $\|f\|^2 \geq a_n$. Así, tomando límites en n tenemos que:

$$a := \sum_{k=0}^{\infty} |\langle f, \varphi_k \rangle|^2 \leq \|f\|^2$$

Esta es la conocida como **Desigualdad de Bessel**.

Por tanto, tenemos que $(a_n)_n$ es de Cauchy, luego $(s_n)_n$ ha de serlo también. Al estar además en un espacio de Banach, podemos asegurarnos de que $(s_n)_n$ es convergente a s .

Nota:

Este resultado garantiza la convergencia en norma de las sumas parciales de Fourier a su límite. No tiene por qué darse $f(x) = s(x)$. Cabe preguntarse si esto es a su vez equivalente a $\|f - s_n\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$. Pasaremos a estudiar escenarios donde puede ocurrir.

4.1.6 Identidad de Parseval

Sea $f \in L_2(I, K)$. Sea $\{\varphi_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subseteq L_2(I, K)$ un sistema ortonormal. Sea $c_n := \langle f, \varphi_n \rangle$ para cada $n \in \mathbb{N}$. Entonces,

$$\|f - s_n\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \iff \sum_{n=0}^{\infty} |c_n|^2 = \|f\|^2$$

Demostración:

Por el Teorema de óptima aproximación, sabemos que:

$$\|f - s_n\|^2 = \|f\|^2 - \sum_{k=0}^n |c_k|^2 \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

Despejamos y tomamos límites:

$$\lim_n \|f - s_n\|^2 = 0 \iff \sum_{k=0}^{\infty} |c_k|^2 = \|f\|^2$$

4.1.7 Definición de sistema ortonormal completo

Sea H un espacio de Hilbert. Sea $\{\varphi_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ un sistema ortonormal. Se dice “completo” si satisface la Identidad de Parseval para cualquier $f \in H$. Es decir,

$$\sum_{k=0}^{\infty} \langle f, \varphi_k \rangle^2 = \|f\|^2 \quad \forall f \in H$$

Nota:

Por la Desigualdad de Bessel, sabemos que $\sum_{k=0}^{\infty} |c_k|^2 \leq \|f\|^2$. Exigir la igualdad equivale a decir que la norma se resume completamente por el sistema ortonormal: el sistema puede aportar información sobre todo el espacio H . Por tanto, toda componente de f queda recogida por cierto φ_n , luego $f \neq 0$ implica que no es ortogonal a todo el sistema.

4.1.8 Ejemplo de sistema ortonormal completo

En $L_2(I, K)$, el siguiente sistema ortonormal es completo:

$$\left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \frac{\cos(t)}{\sqrt{\pi}}, \frac{\sin(t)}{\sqrt{\pi}}, \frac{\cos(2t)}{\sqrt{\pi}}, \frac{\sin(2t)}{\sqrt{\pi}}, \dots \right\}$$

La demostración es demasiado larga, luego no se verá.

Este es el sistema ortonormal más utilizado, y la serie de Fourier de una función f respecto de él, se denomina simplemente “serie de Fourier de f ”. Viene representada por:

$$f(t) \sim \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(nt) + b_n \sin(nt)]$$

Donde “ \sim ” significa convergencia en media cuadrática. Podemos obtener los coeficientes a_n, b_n por identificación al aplicar la ortonormalidad. Por definición, la suma parcial k -ésima de Fourier de f viene dada por:

$$s_k(t) = \sum_{n=0}^k \langle f, \varphi_n \rangle \varphi_n(t) = \frac{c_0}{\sqrt{2\pi}} + \sum_{n=1}^k \left[c_{2n-1} \frac{\cos(nt)}{\sqrt{\pi}} + c_{2n} \frac{\sin(nt)}{\sqrt{\pi}} \right]$$

De este modo, comparando:

$$a_n = \frac{c_{2n-1}}{\sqrt{\pi}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \langle f, \varphi_{2n-1} \rangle = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}(t) \cdot \cos(nt) dt$$
$$b_n = \frac{c_{2n}}{\sqrt{\pi}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \langle f, \varphi_{2n} \rangle = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \bar{f}(t) \cdot \sin(nt) dt$$

4.1.9 Ejemplo de cálculo de serie de Fourier

Halleemos la serie de Fourier de la siguiente función f :

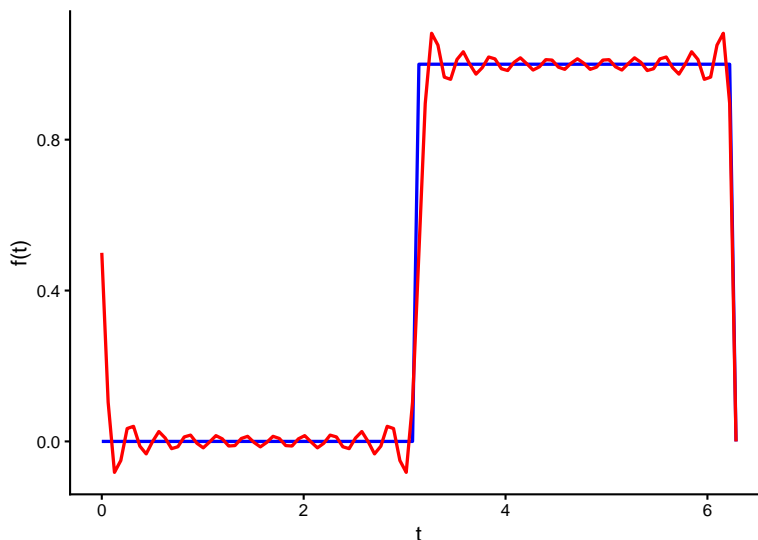
$$f : [0, 2\pi] \longrightarrow \mathbb{R} \quad x \longmapsto f(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \in [0, \pi) \cup \{2\pi\} \\ 1 & \text{si } x \in [\pi, 2\pi) \end{cases}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi 0 \cdot \cos(nt) dt + \frac{1}{\pi} \int_\pi^{2\pi} 1 \cdot \cos(nt) dt = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{n} \sin(nt) \right]_{t=\pi}^{t=2\pi} = 0$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[-\frac{1}{n} \cos(nt) \right]_{t=\pi}^{t=2\pi} = \frac{-1}{n\pi} \left(\underbrace{\cos(2n\pi)}_0 - \cos(n\pi) \right) = \begin{cases} -\frac{2}{n\pi} & \text{si } n \text{ es impar} \\ 0 & \text{si } n \text{ es par} \end{cases}$$

Por tanto, tenemos que:

$$f(t) \sim \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin((2n+1)t)$$



Aproximación de f por su serie de Fourier

Para $t = \pi$, tenemos que $f(\pi) = 1$, pero $s(\pi) = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} 0 = \frac{1}{2}$. ¿Por qué ocurre esto? ¿Cuándo se da la convergencia puntual? ¿En qué partes de la función? El siguiente apartado de esta unidad estudia estas preguntas.

§2. Estudio de la convergencia puntual

4.2.1 Teorema de Riesz-Fisher

Sea $\{\varphi_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subseteq L_2(I, K)$ un sistema ortonormal. Sea $\{c_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subseteq K$ que verifica $\sum_{n=0}^{\infty} |c_n|^2 < \infty$. Entonces, existe una función f de $L_2(I, K)$ que cumple simultáneamente:

$$c_n = \langle f, \varphi_n \rangle \quad \forall n \in \mathbb{N} \qquad \sum_{n=0}^{\infty} |c_n|^2 < \|f\|^2$$

Demostración:

Recordemos que la sucesión $(s_n)_n = (\sum_{k=0}^n c_k \varphi_k)_n$ es de Cauchy, pues dados $p, q \in \mathbb{N}$ con $p < q$, se cumple:

$$\|s_p - s_q\|^2 = \left\| \sum_{k=p+1}^q s_k \right\|^2 = \sum_{k=p+1}^q |c_k|^2 \xrightarrow{p, q \rightarrow \infty} 0$$

Por hipótesis, $\sum_{k=0}^{\infty} |c_k|^2 < \infty$ luego el término general tiende a cero. Así, la suma de términos generales también tenderá a cero.

Al trabajar con un espacio de Hilbert, podemos asegurar que existe $f \in L_2(I, K)$ tal que $\|s_n - f\| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$. Sea $k \in \mathbb{N}$ cualquiera, veamos que $c_k = \langle f, \varphi_k \rangle$: