

# SERIE Y TRANSFORMADA DE FOURIER

FUNCIONES ORTOGONALES. SERIES DE FOURIER. INTEGRAL DE FOURIER. TRANSFORMADA SENO Y COSENO.  
TRANSFORMADA DE FOURIER. EJEMPLOS.

---

Manuel Carlevaro

Departamento de Ingeniería Mecánica

Grupo de Materiales Granulares - UTN FRLP

manuel.carlevaro@gmail.com

Secuencia infinita  $\{\phi_n(x)\}$   
integrable en  $[a, b]$  y

$$\int_a^b \phi_i(x) \phi_j(x) dx = 0, \quad i \neq j$$

## FUNCIONES ORTOGONALES

Secuencia infinita  $\{\phi_n(x)\}$

integrable en  $[a, b]$  y

$$\int_a^b \phi_i(x) \phi_j(x) dx = 0, \quad i \neq j$$

familia **ortogonal** de funciones en  $[a, b]$ . Supongamos que existe

$$\int_a^b f(x) dx$$

y

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \phi_n(x)$$

$$c_3 = ?$$

$$f(x) \phi_3(x) = \sum_{i=1}^{\infty} c_i \phi_i(x) \phi_3(x)$$

## FUNCIONES ORTOGONALES

Secuencia infinita  $\{\phi_n(x)\}$

integrable en  $[a, b]$  y

$$\int_a^b \phi_i(x) \phi_j(x) dx = 0, \quad i \neq j$$

familia **ortogonal** de funciones en  $[a, b]$ . Supongamos que existe

$$\int_a^b f(x) dx$$

y

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \phi_n(x)$$

$$c_3 = ?$$

$$f(x) \phi_3(x) = \sum_{i=1}^{\infty} c_i \phi_i(x) \phi_3(x)$$

$$\int_a^b f(x) \phi_3(x) dx =$$

$$\int_a^b \sum_{i=1}^{\infty} c_i \phi_i(x) \phi_3(x) dx =$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} \int_a^b c_i \phi_i(x) \phi_3(x) dx =$$

$$c_3 \int_a^b \phi_3^2(x) dx$$

$$c_k = \frac{\int_a^b f(x) \phi_k(x) dx}{\int_a^b \phi_k^2(x) dx} \quad (1)$$

# FUNCIONES ORTOGONALES

Secuencia infinita  $\{\phi_n(x)\}$

integrable en  $[a, b]$  y

$$\int_a^b \phi_i(x) \phi_j(x) dx = 0, \quad i \neq j$$

familia **ortogonal** de funciones en  $[a, b]$ . Supongamos que existe

$$\int_a^b f(x) dx$$

y

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \phi_n(x)$$

$$c_3 = ?$$

$$f(x) \phi_3(x) = \sum_{i=1}^{\infty} c_i \phi_i(x) \phi_3(x)$$

$$\int_a^b f(x) \phi_3(x) dx =$$

$$\int_a^b \sum_{i=1}^{\infty} c_i \phi_i(x) \phi_3(x) dx =$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} \int_a^b c_i \phi_i(x) \phi_3(x) dx =$$

$$c_3 \int_a^b \phi_3^2(x) dx$$

$$c_k = \frac{\int_a^b f(x) \phi_k(x) dx}{\int_a^b \phi_k^2(x) dx} \quad (1)$$

**Definición :**

Producto interno:

$$\langle f, g \rangle = \int_a^b f(x) g(x) dx$$

Con  $c_k$  definida por (1):

$$f(x) \sim \sum_{n=1}^{\infty} c_n \phi_n(x) = F(x)$$

$F(x)$  es la **representación de Fourier** de  $f(x)$  con respecto de  $\{\phi_n(x)\}$ .

Se puede demostrar:

$$\int_a^b \left[ f(x) - \sum_{k=1}^n c_k \phi_k(x) \right]^2 dx \leq$$

$$\int_a^b \left[ f(x) - \sum_{k=1}^n d_k \phi_k(x) \right]^2 dx$$

### Caso especial:

$$\{1, \cos x, \cos 2x, \cos 3x, \dots, \\ \sin x, \sin 2x, \sin 3x, \dots\}$$

↪ conjunto ortogonal en  $[-\pi, \pi]$ .

Por ejemplo, si  $m \neq n$ :

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} \cos mx \cos nx \, dx &= \\ \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} [\cos(m+n)x + \cos(m-n)x] \, dx &= \\ \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin(m+n)x}{m+n} + \frac{\sin(m-n)x}{m-n} \right]_{x=-\pi}^{\pi} &= 0 \end{aligned}$$

### Caso especial:

$$\{1, \cos x, \cos 2x, \cos 3x, \dots, \\ \sin x, \sin 2x, \sin 3x, \dots\}$$

↪ conjunto ortogonal en  $[-\pi, \pi]$ .

Por ejemplo, si  $m \neq n$ :

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} \cos mx \cos nx \, dx &= \\ \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} [\cos(m+n)x + \cos(m-n)x] \, dx &= \\ \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin(m+n)x}{m+n} + \frac{\sin(m-n)x}{m-n} \right]_{x=-\pi}^{\pi} &= 0 \end{aligned}$$

### Resultado clave:

Supongamos que  $f(x)$  sea suave a tramos en  $[-\pi, \pi]$ , y que

$$F(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos nx + \sum_{n=0}^{\infty} b_n \sin nx$$

es la representación de Fourier de  $f(x)$ . Entonces, para  $x_0 \in [-\pi, \pi]$ :

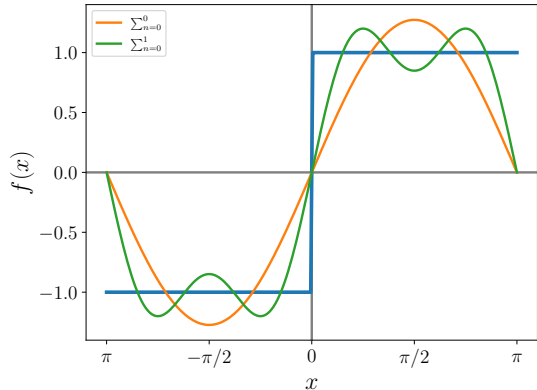
$$F(x_0) = \frac{f(x_0^+) + f(x_0^-)}{2}$$

### Ejemplo:

$$f(x) = \begin{cases} -1, & -\pi \leq x < 0 \\ 1, & 0 \leq x < \pi \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 F(x) &= \frac{4}{\pi} \sum_{n \text{ impar}}^{\infty} \frac{\text{sen } nx}{n} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\text{sen}(2n+1)x}{2n+1} \\
 &= \frac{4}{\pi} \left( \text{sen } x + \frac{\text{sen } 3x}{3} + \frac{\text{sen } 5x}{5} + \dots \right)
 \end{aligned}$$

Primeros dos términos:



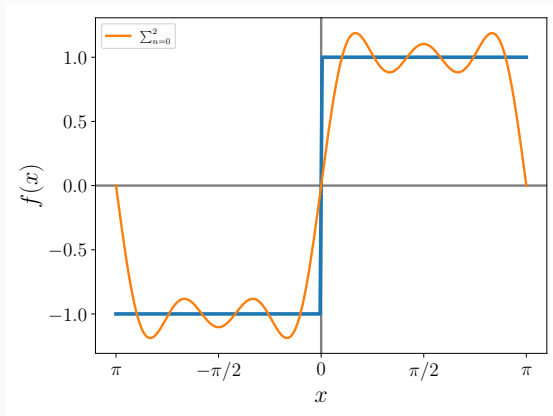
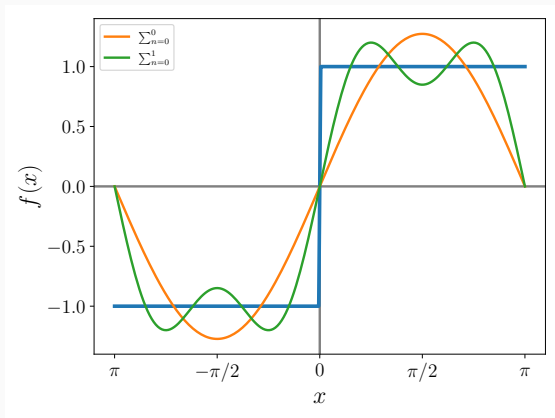


Agregando más términos:

$$F(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{n \text{ impar}} \frac{\text{sen } nx}{n} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\text{sen}(2n+1)x}{2n+1}$$

$$= \frac{4}{\pi} \left( \text{sen } x + \frac{\text{sen } 3x}{3} + \frac{\text{sen } 5x}{5} + \dots \right)$$

Primeros dos términos:

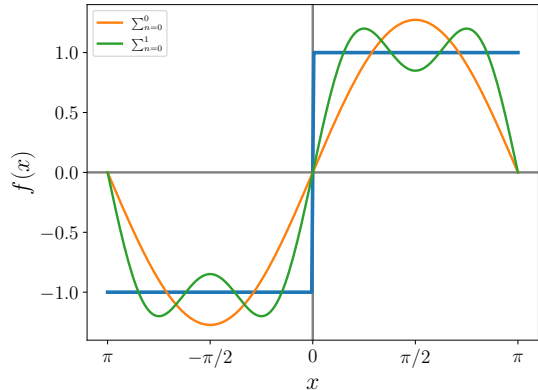


$$F_2(x) = \frac{4}{\pi} \left( \text{sen } x + \frac{\text{sen } 3x}{3} + \frac{\text{sen } 5x}{5} \right)$$

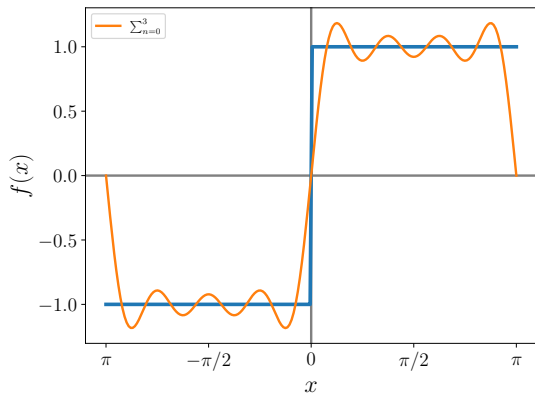
$$F(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{n \text{ impar}}^{\infty} \frac{\text{sen } nx}{n} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\text{sen}(2n+1)x}{2n+1}$$

$$= \frac{4}{\pi} \left( \text{sen } x + \frac{\text{sen } 3x}{3} + \frac{\text{sen } 5x}{5} + \dots \right)$$

Primeros dos términos:



Agregando más términos:

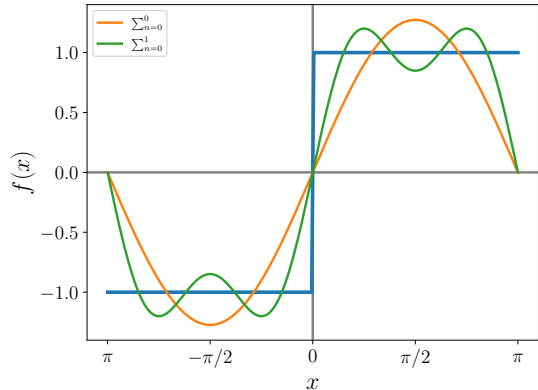


$$F_3(x) = \frac{4}{\pi} \left( \text{sen } x + \frac{\text{sen } 3x}{3} + \frac{\text{sen } 5x}{5} + \frac{\text{sen } 7x}{7} \right)$$

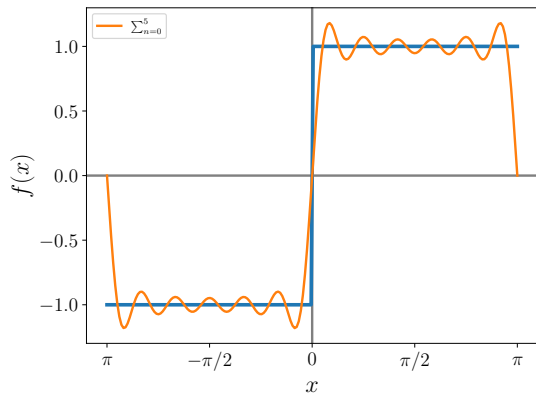
$$F(x) = \frac{4}{\pi} \sum_{n \text{ impar}}^{\infty} \frac{\text{sen } nx}{n} = \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\text{sen}(2n+1)x}{2n+1}$$

$$= \frac{4}{\pi} \left( \text{sen } x + \frac{\text{sen } 3x}{3} + \frac{\text{sen } 5x}{5} + \dots \right)$$

Primeros dos términos:



Agregando más términos:

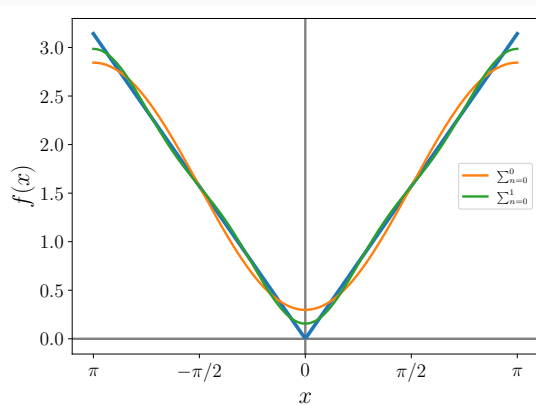


$$F_5(x) = \frac{4}{\pi} \left( \dots + \frac{\text{sen } 9x}{9} + \frac{\text{sen } 11x}{11} + \frac{\text{sen } 13x}{13} \right)$$

### Otro ejemplo:

$$f(x) = |x|, \quad -\pi < x < \pi$$

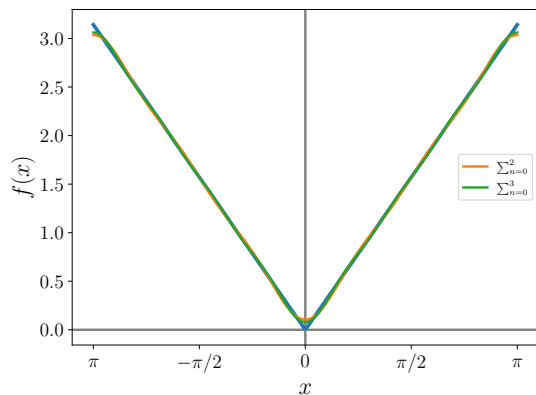
$$F(x) = \frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \sum_{n \text{ impar}}^{\infty} \frac{\cos nx}{n^2}$$



### Otro ejemplo:

$$f(x) = |x|, \quad -\pi < x < \pi$$

$$F(x) = \frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \sum_{n \text{ impar}}^{\infty} \frac{\cos nx}{n^2}$$



### Comparación con serie de potencias:

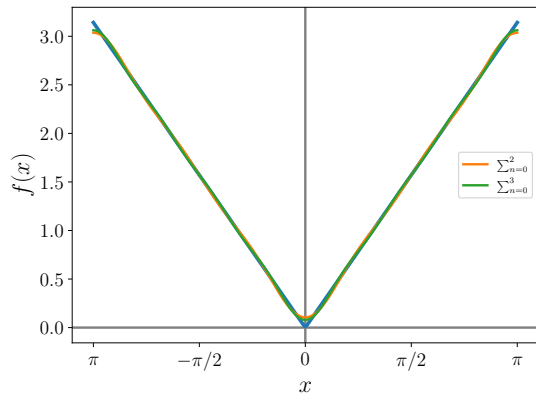
$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$$

$$= 1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + \frac{x^4}{24} + \frac{x^5}{120} + \dots$$

## Otro ejemplo:

$$f(x) = |x|, \quad -\pi < x < \pi$$

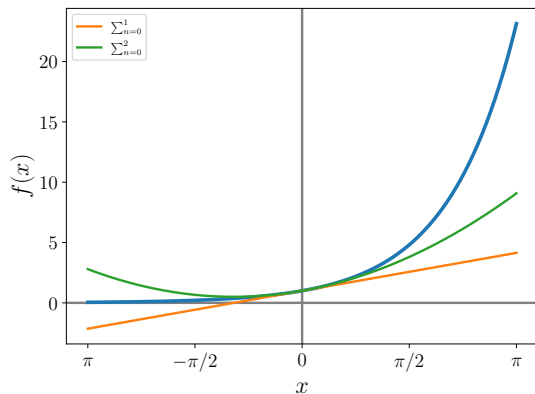
$$F(x) = \frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \sum_{n \text{ impar}}^{\infty} \frac{\cos nx}{n^2}$$



## Comparación con serie de potencias:

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$$

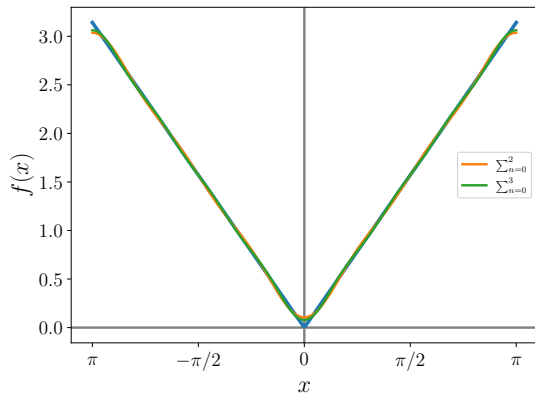
$$= 1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + \frac{x^4}{24} + \frac{x^5}{120} + \dots$$



## Otro ejemplo:

$$f(x) = |x|, \quad -\pi < x < \pi$$

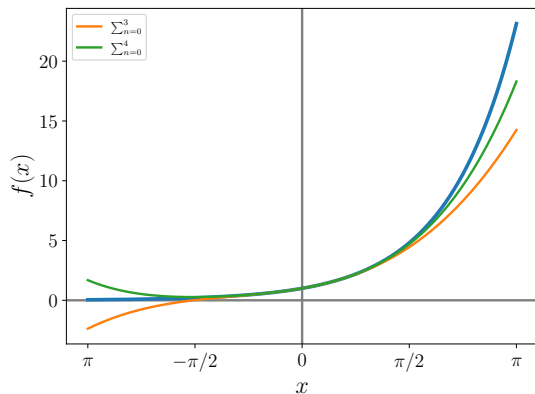
$$F(x) = \frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \sum_{n \text{ impar}}^{\infty} \frac{\cos nx}{n^2}$$



## Comparación con serie de potencias:

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$$

$$= 1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{6} + \frac{x^4}{24} + \frac{x^5}{120} + \dots$$



Del ejercicio 6 (Práctica 3):

$$f_L(x) = \begin{cases} 0, & -L < x < -1 \\ 1, & -1 < x < 1 \\ 0, & 1 < x < L \end{cases}$$



Del ejercicio 6 (Práctica 3):

$$f_L(x) = \begin{cases} 0, & -L < x < -1 \\ 1, & -1 < x < 1 \\ 0, & 1 < x < L \end{cases}$$

Función par:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{n\pi x}{L}, \quad a_0 = \frac{1}{2L} \int_{-1}^1 dx = \frac{1}{L}$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-1}^1 \cos \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{2}{L} \int_0^1 \cos \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{2}{L} \frac{\sin(n\pi/L)}{n\pi/L}$$

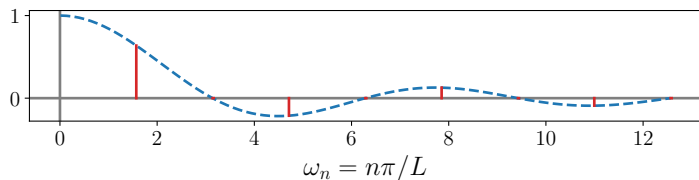
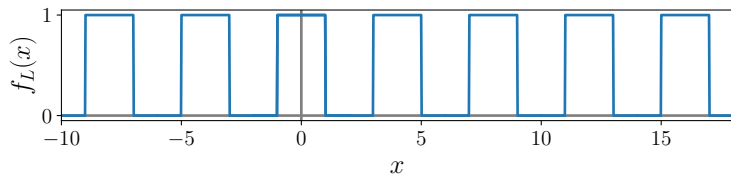
Del ejercicio 6 (Práctica 3):

Función par:

$$f_L(x) = \begin{cases} 0, & -L < x < -1 \\ 1, & -1 < x < 1 \\ 0, & 1 < x < L \end{cases}$$

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{n\pi x}{L}, \quad a_0 = \frac{1}{2L} \int_{-1}^1 dx = \frac{1}{L}$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-1}^1 \cos \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{2}{L} \int_0^1 \cos \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{2}{L} \frac{\sin(n\pi/L)}{n\pi/L}$$



$$2L = 4$$

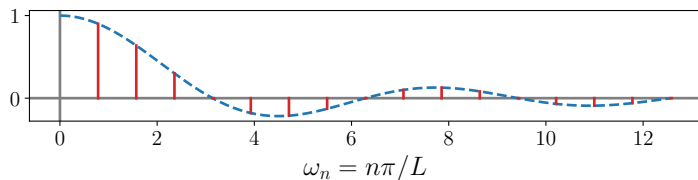
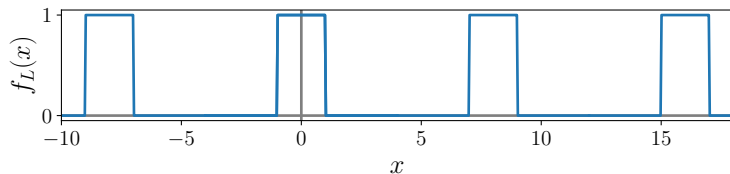
Del ejercicio 6 (Práctica 3):

Función par:

$$f_L(x) = \begin{cases} 0, & -L < x < -1 \\ 1, & -1 < x < 1 \\ 0, & 1 < x < L \end{cases}$$

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{n\pi x}{L}, \quad a_0 = \frac{1}{2L} \int_{-1}^1 dx = \frac{1}{L}$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-1}^1 \cos \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{2}{L} \int_0^1 \cos \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{2}{L} \frac{\sin(n\pi/L)}{n\pi/L}$$



$$2L = 8$$

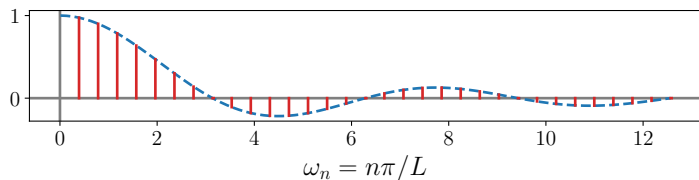
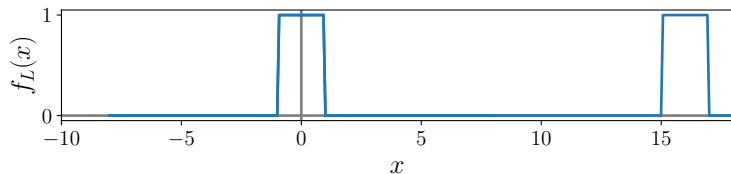
Del ejercicio 6 (Práctica 3):

Función par:

$$f_L(x) = \begin{cases} 0, & -L < x < -1 \\ 1, & -1 < x < 1 \\ 0, & 1 < x < L \end{cases}$$

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{n\pi x}{L}, \quad a_0 = \frac{1}{2L} \int_{-1}^1 dx = \frac{1}{L}$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-1}^1 \cos \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{2}{L} \int_0^1 \cos \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{2}{L} \frac{\sin(n\pi/L)}{n\pi/L}$$



$$2L = 16$$

Sea  $f_L(x)$  una función de período  $2L$ :

$$f_L(x) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n x + b_n \operatorname{sen} \omega_n x)$$

donde

$$\omega_n = \frac{n\pi}{L} \quad a_0 = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f_L(x) dx$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f_L(x) \cos \omega_n dx$$

$$b_0 = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f_L(x) \operatorname{sen} \omega_n dx$$

$$\begin{aligned} f_L(x) = & \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f_L(\xi) d\xi \\ & + \frac{1}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \cos \omega_n x \int_{-L}^L f_L(\xi) \cos \omega_n \xi d\xi \right. \\ & \left. + \operatorname{sen} \omega_n x \int_{-L}^L f_L(\xi) \operatorname{sen} \omega_n \xi d\xi \right] \end{aligned}$$

Sea  $f_L(x)$  una función de período  $2L$ :

Ahora hacemos:

$$f_L(x) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n x + b_n \operatorname{sen} \omega_n x)$$

$$\Delta\omega = \omega_{n+1} - \omega_n = \frac{(n+1)\pi}{L} - \frac{n\pi}{L} = \frac{\pi}{L}$$

donde

$$\omega_n = \frac{n\pi}{L} \quad a_0 = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f_L(x) dx$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f_L(x) \cos \omega_n x dx$$

$$b_0 = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f_L(x) \operatorname{sen} \omega_n x dx$$

$$\begin{aligned} f_L(x) &= \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f_L(\xi) d\xi \\ &+ \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ (\cos \omega_n x) \Delta\omega \int_{-L}^L f_L(\xi) \cos \omega_n \xi d\xi \right. \\ &\quad \left. + (\operatorname{sen} \omega_n x) \Delta\omega \int_{-L}^L f_L(\xi) \operatorname{sen} \omega_n \xi d\xi \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_L(x) &= \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f_L(\xi) d\xi \\ &+ \frac{1}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \cos \omega_n x \int_{-L}^L f_L(\xi) \cos \omega_n \xi d\xi \right. \\ &\quad \left. + \operatorname{sen} \omega_n x \int_{-L}^L f_L(\xi) \operatorname{sen} \omega_n \xi d\xi \right] \end{aligned}$$

Sea  $f_L(x)$  una función de período  $2L$ :

$$f_L(x) = a_0 + \sum_{i=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n x + b_n \operatorname{sen} \omega_n x)$$

donde

$$\omega_n = \frac{n\pi}{L} \quad a_0 = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f_L(x) dx$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f_L(x) \cos \omega_n x dx$$

$$b_0 = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f_L(x) \operatorname{sen} \omega_n x dx$$

$$\begin{aligned} f_L(x) = & \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f_L(\xi) d\xi \\ & + \frac{1}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \cos \omega_n x \int_{-L}^L f_L(\xi) \cos \omega_n \xi d\xi \right. \\ & \left. + \operatorname{sen} \omega_n x \int_{-L}^L f_L(\xi) \operatorname{sen} \omega_n \xi d\xi \right] \end{aligned}$$

Ahora hacemos:

$$\Delta\omega = \omega_{n+1} - \omega_n = \frac{(n+1)\pi}{L} - \frac{n\pi}{L} = \frac{\pi}{L}$$

$$\begin{aligned} f_L(x) = & \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f_L(\xi) d\xi \\ & + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ (\cos \omega_n x) \Delta\omega \int_{-L}^L f_L(\xi) \cos \omega_n \xi d\xi \right. \\ & \left. + (\operatorname{sen} \omega_n x) \Delta\omega \int_{-L}^L f_L(\xi) \operatorname{sen} \omega_n \xi d\xi \right] \end{aligned}$$

Tomamos  $L \rightarrow \infty$ , y asumimos que

$$f(x) = \lim_{L \rightarrow \infty} f_L(x)$$

es **absolutamente** integrable en el eje  $x$ :

$$\lim_{a \rightarrow -\infty} \int_a^0 |f(x)| dx + \lim_{b \rightarrow \infty} \int_0^b |f(x)| dx \mapsto \text{existe}$$

La representación de  $f(x)$  por una **integral de Fourier**:

$$f(x) = \int_0^{\infty} [A(\omega) \cos \omega x + B(\omega) \sin \omega x] d\omega \quad (2)$$

donde:

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \cos \omega \xi d\xi \\ B(\omega) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \sin \omega \xi d\xi \end{aligned} \quad (3)$$

### **Teorema : Integral de Fourier.**

*Si  $f(x)$  es suave a tramos en cada intervalo finito y tiene derivadas por derecha y por izquierda en cada punto, y si es absolutamente integrable en  $(-\infty, \infty)$ , entonces  $f(x)$  puede representarse como una integral de Fourier (2) con  $A$  y  $B$  dados por (3). En los puntos en que  $f(x)$  es discontinua, el valor de la integral de Fourier es el promedio de los valores laterales de  $f(x)$  en esos puntos.*

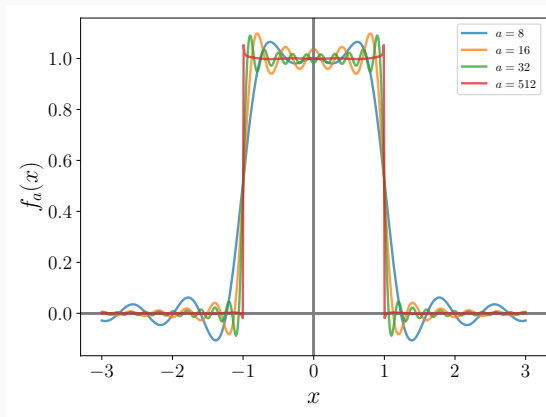


$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{si } |x| < 1 \\ 0, & \text{si } |x| > 1 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \cos \omega \xi d\xi \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 f(\xi) \cos \omega \xi d\xi = \left. \frac{\text{sen } \omega \xi}{\pi \omega} \right|_{-1}^1 = \frac{2 \text{sen } \omega}{\pi \omega} \end{aligned}$$

$$B(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \text{sen } \omega \xi d\xi = 0$$

$$f(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\cos \omega x \text{sen } \omega}{\omega} d\omega$$



**Transformada coseno:** Si  $f(x)$  es par, de (3):

$$f(x) = \int_0^{\infty} A(\omega) \cos \omega x d\omega$$
$$\text{con } A(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} f(\xi) \cos \omega \xi d\xi$$

Llamamos  $A(\omega) = \sqrt{2/\pi} \hat{f}_c(\omega)$ :

$$\hat{f}_c(\omega) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\infty} f(x) \cos \omega x dx \quad (4.a)$$

$$f(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\infty} \hat{f}_c(\omega) \cos \omega x d\omega \quad (4.b)$$

**Transformada seno:** Si  $f(x)$  es impar, de (3):

$$f(x) = \int_0^{\infty} A(\omega) \sen \omega x d\omega$$
$$\text{con } B(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} f(\xi) \sen \omega \xi d\xi$$

Llamamos  $B(\omega) = \sqrt{2/\pi} \hat{f}_s(\omega)$ :

$$\hat{f}_s(\omega) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\infty} f(x) \sen \omega x dx \quad (5.a)$$

$$f(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\infty} \hat{f}_s(\omega) \sen \omega x d\omega \quad (5.b)$$

De las ecuaciones (2) y (3):

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) [\cos \omega \xi \cos \omega x \\ &\quad + \sin \omega \xi \sin \omega x] d\xi d\omega \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \cos(\omega x - \omega \xi) d\xi \right] d\omega \end{aligned}$$

$[\cdot]$  es una función par:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \cos(\omega x - \omega \xi) d\xi \right] d\omega \quad (6)$$

Si usamos  $\sin$  en vez de  $\cos$ ,  $[\cdot]$  es impar y

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \sin(\omega x - \omega \xi) d\xi \right] d\omega = 0 \quad (7)$$

De las ecuaciones (2) y (3):

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) [\cos \omega \xi \cos \omega x \\ &\quad + \sin \omega \xi \sin \omega x] d\xi d\omega \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \cos(\omega x - \omega \xi) d\xi \right] d\omega \end{aligned}$$

$[\cdot]$  es una función par:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \cos(\omega x - \omega \xi) d\xi \right] d\omega \quad (6)$$

Si usamos sen en vez de cos,  $[\cdot]$  es impar y

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \sin(\omega x - \omega \xi) d\xi \right] d\omega = 0 \quad (7)$$

Tomamos el integrando de (6) y le sumamos  $i$  multiplicado por el integrando de (7), usando la fórmula de Euler

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x$$

obtenemos la **integral de Fourier compleja**:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) e^{i\omega(x-\xi)} d\xi d\omega$$

Escribiendo la exponencial de la suma como producto de exponenciales:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} f(\xi) e^{-i\omega \xi} d\xi \right] e^{i\omega x} d\omega \quad (8)$$

**Transformada de Fourier** de  $f$ :

$$\hat{f}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\omega x} dx \quad (9)$$

**Transformada inversa de Fourier** de  $\hat{f}$ :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\omega) e^{i\omega x} d\omega \quad (10)$$

Otra nomenclatura:

$$\hat{f} = \mathcal{F}(f), \quad f = \mathcal{F}^{-1}(\hat{f})$$

## Teorema : Existencia de $\hat{f}$ .

*Si  $f(x)$  es absolutamente convergente en  $(-\infty, \infty)$  y continua a tramos en intervalos finitos, entonces existe la transformada de Fourier  $\hat{f}(\omega)$  de  $f(x)$  dada por la ecuación (9).*

Encontrar  $\hat{f}$  de  $f(x) = 1$  si  $|x| < 1$  y  $f(x) = 0$  en otro caso.

$$\begin{aligned}\hat{f}(\omega) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-1}^1 e^{-i\omega x} dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left. \frac{e^{-i\omega x}}{-i\omega} \right|_{-1}^1 = \frac{1}{-i\omega\sqrt{2\pi}} (e^{-i\omega} - e^{i\omega})\end{aligned}$$

Usando la fórmula de Euler:

$$e^{i\omega} - e^{-i\omega} = 2i \operatorname{sen} \omega$$

resulta

$$\hat{f}(\omega) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\operatorname{sen} \omega}{\omega} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \operatorname{senc} \omega$$

Encontrar  $\hat{f}$  de  $f(x) = 1$  si  $|x| < 1$  y  $f(x) = 0$  en otro caso.

$$\begin{aligned}\hat{f}(\omega) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-1}^1 e^{-i\omega x} dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left. \frac{e^{-i\omega x}}{-i\omega} \right|_{-1}^1 = \frac{1}{-i\omega\sqrt{2\pi}} (e^{-i\omega} - e^{i\omega})\end{aligned}$$

Usando la fórmula de Euler:

$$e^{i\omega} - e^{-i\omega} = 2i \operatorname{sen} \omega$$

resulta

$$\hat{f}(\omega) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{\operatorname{sen} \omega}{\omega} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \operatorname{senc} \omega$$

Encontrar  $\hat{f}$  de  $f(x) = e^{-ax}$  si  $x > 0$  y  $f(x) = 0$  si  $x < 0$ .

$$\begin{aligned}\hat{f}(\omega) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-ax} e^{-i\omega x} dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left. \frac{e^{-(a+i\omega)x}}{-(a+i\omega)} \right|_0^\infty \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}(a+i\omega)}\end{aligned}$$

Representación **espectral**:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\omega) e^{i\omega x} d\omega$$

Densidad espectral  $\hat{f}(\omega) \mapsto$  intensidad de  $f(x)$  en  $(\omega, \omega + d\omega)$ .

$$mx'' + kx = 0$$

$\times x'$  :  $mx'x'' + kx'x = 0$ . Integrando:

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = E_0 = \text{constante}$$

Solución general:

$$x = a_1 \cos \omega_0 t + b_1 \sin \omega_0 t = \underbrace{c_1 e^{i\omega_0 t}}_A + \underbrace{c_{-1} e^{-i\omega_0 t}}_B$$

donde  $\omega_0^2 = k/m$ ,  $c_1 = (a_1 - ib_1)/2$ ,  
 $c_{-1} = \bar{c}_1 = (a_1 + ib_1)/2$ .



## INTERPRETACIÓN FÍSICA: ESPECTRO DE ENERGÍA

Representación **espectral**:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\omega) e^{i\omega x} d\omega$$

Densidad espectral  $\hat{f}(\omega) \mapsto$  intensidad de  $f(x)$  en  $(\omega, \omega + d\omega)$ .

$$mx'' + kx = 0$$

$\times x'$  :  $mx'x'' + kx'x = 0$ . Integrando:

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = E_0 = \text{constante}$$

Solución general:

$$x = a_1 \cos \omega_0 t + b_1 \sin \omega_0 t = \underbrace{c_1 e^{i\omega_0 t}}_A + \underbrace{c_{-1} e^{-i\omega_0 t}}_B$$

donde  $\omega_0^2 = k/m$ ,  $c_1 = (a_1 - ib_1)/2$ ,  
 $c_{-1} = \bar{c}_1 = (a_1 + ib_1)/2$ .

$$x = A + B, x' = v = A' + B' = i\omega_0(A - B):$$

$$E_0 = \frac{1}{2}m(i\omega_0)^2(A - B)^2 + \frac{1}{2}k(A + B)^2$$

$$E_0 = \frac{1}{2}k [-(A - B)^2 + (A + B)^2]$$

$$= 2kAB = 2kc_1 e^{i\omega_0 t} c_{-1} e^{-i\omega_0 t}$$

$$= 2kc_1 c_{-1} = 2k|c_1|^2$$

Sistema más complejo:  $x = f(t) \mapsto$  periódica:

**Espectro discreto:**  $|c_1|^2 \mapsto |c_n|^2$  (conjunto contable de frecuencias aisladas).

Sistema más complejo:  $x = f(t) \mapsto$  no periódica:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\hat{f}(\omega)|^2 d\omega$$

es la **energía total** del sistema.

### Teorema : Linealidad de $\mathcal{F}$ .

La transformada de Fourier es una **operación lineal**, esto es, para cualquier par de funciones  $f(x)$  y  $g(x)$  cuyas transformadas existan, y para cualesquiera constantes  $a$  y  $b$ , la transformada de Fourier de  $af + bg$  existe y

$$\mathcal{F}(af + bg) = a\mathcal{F}(f) + b\mathcal{F}(g)$$

### Teorema : Linealidad de $\mathcal{F}$ .

La transformada de Fourier es una **operación lineal**, esto es, para cualquier par de funciones  $f(x)$  y  $g(x)$  cuyas transformadas existan, y para cualesquiera constantes  $a$  y  $b$ , la transformada de Fourier de  $af + bg$  existe y

$$\mathcal{F}(af + bg) = a\mathcal{F}(f) + b\mathcal{F}(g)$$

### Teorema : Transformada de la derivada.

Sea  $f(x)$  continua en  $(-\infty, \infty)$  y  $f(x) \rightarrow 0$  cuando  $|x| \rightarrow \infty$ . Entonces, si  $f'(x)$  es absolutamente integrable en el eje  $x$ :

$$\mathcal{F}[f'(x)] = i\omega\mathcal{F}[f(x)]$$

## Teorema : Linealidad de $\mathcal{F}$ .

La transformada de Fourier es una **operación lineal**, esto es, para cualquier par de funciones  $f(x)$  y  $g(x)$  cuyas transformadas existan, y para cualesquiera constantes  $a$  y  $b$ , la transformada de Fourier de  $af + bg$  existe y

$$\mathcal{F}(af + bg) = a\mathcal{F}(f) + b\mathcal{F}(g)$$

## Teorema : Transformada de la derivada.

Sea  $f(x)$  continua en  $(-\infty, \infty)$  y  $f(x) \rightarrow 0$  cuando  $|x| \rightarrow \infty$ . Entonces, si  $f'(x)$  es absolutamente integrable en el eje  $x$ :

$$\mathcal{F}[f'(x)] = i\omega\mathcal{F}[f(x)]$$

La **convolución**  $f * g$  de las funciones  $f$  y  $g$  se define complejo:

$$\begin{aligned} h(x) = (f * g)(x) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(x - \tau) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x - \tau)g(\tau) d\tau \end{aligned}$$

## Teorema : Linealidad de $\mathcal{F}$ .

La transformada de Fourier es una **operación lineal**, esto es, para cualquier par de funciones  $f(x)$  y  $g(x)$  cuyas transformadas existan, y para cualesquiera constantes  $a$  y  $b$ , la transformada de Fourier de  $af + bg$  existe y

$$\mathcal{F}(af + bg) = a\mathcal{F}(f) + b\mathcal{F}(g)$$

## Teorema : Transformada de la derivada.

Sea  $f(x)$  continua en  $(-\infty, \infty)$  y  $f(x) \rightarrow 0$  cuando  $|x| \rightarrow \infty$ . Entonces, si  $f'(x)$  es absolutamente integrable en el eje  $x$ :

$$\mathcal{F}[f'(x)] = i\omega \mathcal{F}[f(x)]$$

La **convolución**  $f * g$  de las funciones  $f$  y  $g$  se define complejo:

$$\begin{aligned} h(x) = (f * g)(x) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)g(x - \tau) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(x - \tau)g(\tau) d\tau \end{aligned}$$

## Teorema : Convolución.

Sean  $f(x)$  y  $g(x)$  funciones acotadas, continuas por tramos, y absolutamente integrables en  $(-\infty, \infty)$ , entonces

$$\mathcal{F}(f * g) = \sqrt{2\pi} \mathcal{F}(f) \mathcal{F}(g)$$

- ▶ E. Kreyszig, H. Kreyszig y E.J. Norminton. ***Advanced Engineering Mathematics***. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2011. Capítulo 11 (11.7 – 11.9).
- ▶ Peter V O'Neil. ***Matemáticas avanzadas para ingeniería***. 7.<sup>a</sup> ed. México, DF: CENGAGE Learning Custom Publishing, 2012. Capítulo 3.
- ▶ K A Stroud y Dexter J Booth. ***Advanced Engineering Mathematics***. 6.<sup>a</sup> ed. London, England: Bloomsbury Academic, 2020. Capítulos 9.
- ▶ E. Kreyszig, H. Kreyszig y E.J. Norminton. ***Advanced Engineering Mathematics***. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2011. Capítulo 11 (11.1 – 11.6).
- ▶ Peter V O'Neil. ***Matemáticas avanzadas para ingeniería***. 7.<sup>a</sup> ed. México, DF: CENGAGE Learning Custom Publishing, 2012. Capítulo 2.
- ▶ K A Stroud y Dexter J Booth. ***Advanced Engineering Mathematics***. 6.<sup>a</sup> ed. London, England: Bloomsbury Academic, 2020. Capítulos 7 y 8.