

Universidad Tecnológica Nacional  
Facultad Regional Córdoba

## **Trabajo Práctico 2**

Analisis de Señales y Sistemas  
2R1

Ernst Pedro 400624  
Leiva Matias 92170  
Tissera Mauro 401187  
Perea Ignacio 406265  
Gatica Marcos Raúl 402006

Fecha de entrega: 17 / 08 / 2025



# Índice

<b>1</b>	<b>Ejercicio 1</b>	<b>3</b>
1.1	Actividad 1 . . . . .	3
1.1.1	A . . . . .	3
1.1.2	B . . . . .	4
1.1.3	C . . . . .	4
1.1.4	D . . . . .	5
1.1.5	E . . . . .	5
1.2	Actividad 2 . . . . .	5
1.2.1	Señal sinusoidal rectificada de onda completa . . . . .	6
1.2.2	Señal sinusoidal rectificada de media onda . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Ejercicio 2</b>	<b>13</b>
2.1	Actividad 1 . . . . .	13
2.1.1	A . . . . .	13
2.1.2	B . . . . .	14
2.1.3	C . . . . .	15
2.1.4	D . . . . .	15
2.1.5	E . . . . .	17
2.1.6	F . . . . .	18
2.1.7	G . . . . .	20
2.2	Actividad 2 . . . . .	23
2.2.1	A . . . . .	23
2.2.2	B . . . . .	25
2.2.3	C . . . . .	27
2.2.4	D . . . . .	29
2.2.5	E . . . . .	31
2.2.6	F . . . . .	32



# Ejercicio 1

## Actividad 1

**Actividad 1.** Dada la secuencia de señales  $\phi_n(t) = e^{j(n\omega)t} : n \in \mathbb{Z}$ , con  $T = \frac{2\pi}{\omega}$ . Demostrar:

**A**

**A)** El período fundamental de la señal  $\phi_n(t)$  es  $T_n = \frac{2\pi}{n\omega}$ . ¿Por qué se puede afirmar que la suma entre éstas señales está bien definida  $\phi_n(t)$ ?

**i.** Lo primero que realizaremos será corroborar que  $T_n$  es un período.

$$\phi_n(t + T_n) = \phi_n(t)$$

$$e^{jn\omega(t+T_n)} = e^{jn\omega(t)}$$

$$e^{jn\omega(t+\frac{2\pi}{n\omega})} = e^{jn\omega(t)}$$

$$e^{jn\omega(t)+jn\omega\frac{2\pi}{n\omega}} = e^{jn\omega(t)}$$

$$e^{jn\omega(t)+j2\pi} = e^{jn\omega(t)}$$

$$e^{jn\omega(t)} \cdot e^{j2\pi} = e^{jn\omega(t)}$$

$$e^{jn\omega(t)} \cdot 1 = e^{jn\omega(t)}$$

$$e^{jn\omega(t)} = e^{jn\omega(t)}$$

**ii.** Para ver que  $T_n$  es el período fundamental, suponemos que existe un  $T' > 0$  con  $T' < T_n$ , tal que  $\phi_n(t + T') = \phi_n(t)$

Sabemos que  $e^{jn\omega T'} = 1$ , por lo que existe un  $k \in \mathbb{Z}$  tal que

$$n\omega T' = 2\pi k$$

Despejando  $n\omega$

$$T' = \frac{2\pi k}{n\omega}$$

Donde si  $k = 0$  entonces  $T' = 0$ , lo cual contradice lo que postulamos al principio que  $T' > 0$

Si  $|k| \geq 1$ , entonces

$$T' \geq \frac{2\pi}{|n|\omega} = T_{|n|}$$

Lo cual contradice que  $T' < T_n$ . Por lo tanto, no existe  $T' \in (0, T_n)$  que sea período.

**iii.**

Ahora bien, podemos concluir que la suma  $\sum_{n \in \mathbb{Z}} \phi_n(t)$  está bien definida porque todas las señales  $\phi_n(t)$  son periódicas con un período común  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  (múltiplo entero de  $T_n$ ). Esto garantiza que la superposición de señales mantenga la periodicidad global.

## B

**B)** Calcular  $E_n = (\phi_n(t), \phi_n(t))_T$  y  $(\phi_n(t), \phi_m(t))_T$ ,  $\forall n, m \in \mathbb{Z}$

Como primer paso definiremos

$$\langle \phi_n, \phi_m \rangle_T = \frac{1}{T} \int_0^T \phi_n(t) \overline{\phi_m(t)} dt$$

**Caso 1:**  $n = m$

$$\begin{aligned} \langle \phi_n, \phi_n \rangle_T &= \frac{1}{T} \int_0^T e^{jn\omega t} e^{-jn\omega t} dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T 1 dt = 1 \quad \forall n \end{aligned}$$

**Caso 2:**  $n \neq m$

$$\begin{aligned} \langle \phi_n, \phi_m \rangle_T &= \frac{1}{T} \int_0^T e^{j(n-m)\omega t} dt \\ &= \frac{e^{j(n-m)\omega t}}{j(n-m)\omega T} \Big|_0^T = 0 \quad (\text{por periodicidad}) \end{aligned}$$

## C

**C)** La secuencia de señales  $\{\phi_n(t) = e^{j(n\omega)t} : n \in \mathbb{Z}\}$  es base de Fourier.

**Propiedades requeridas:**

(i) **Ortogonalidad:**  $\langle \phi_n, \phi_m \rangle_T = \delta_{nm}$  (demostrado en B)

(ii) **Compleitud:** Cualquier señal  $x(t)$  periódica puede expresarse como:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \phi_n(t)$$

## D

**D)** La secuencia de señales  $\{\rho_n^0(t) = \cos(n\omega t) = \frac{1}{2}\phi_n(t) + \frac{1}{2}\overline{\phi_n(t)} : n \geq 0\}$  es base de Fourier.

**Relación con  $\phi_n(t)$ :**

$$\cos(n\omega t) = \frac{1}{2}\phi_n(t) + \frac{1}{2}\phi_{-n}(t)$$

**Ortogonalidad:**

$$\langle \rho_n^0, \rho_m^0 \rangle_T = \begin{cases} 1 & n = m = 0 \\ \frac{1}{2} & n = m \neq 0 \\ 0 & n \neq m \end{cases}$$

## E

**E)** La secuencia de señales

$$\{\rho_n^1(t) = \sin(n\omega t) = \frac{1}{2j}\phi_n(t) - \frac{1}{2j}\overline{\phi_n(t)} : n > 0\}$$

es base de Fourier.

**Relación con  $\phi_n(t)$ :**

$$\sin(n\omega t) = \frac{1}{2j}\phi_n(t) - \frac{1}{2j}\phi_{-n}(t)$$

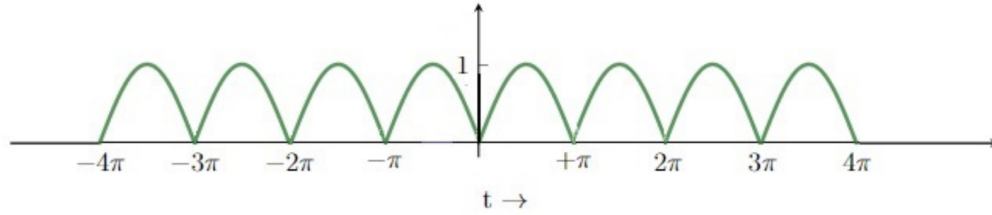
**Ortogonalidad:**

$$\langle \rho_n^1, \rho_m^1 \rangle_T = \begin{cases} \frac{1}{2} & n = m \\ 0 & n \neq m \end{cases}$$

## Actividad 2

**Actividad 2.** Calcular la descomposición de series  $x(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n \rho_n^0(t) + b_n \rho_n^1(t)$  de las siguientes señales. Para luego calcular aproximadamente la energía de la señal usando el teorema de Parseval.

## Señal sinusoidal rectificada de onda completa



La señal se trata de  $x(t) = |\text{sen}(t)|$ .

Primero debemos tomar el período de la señal, el cual es igual a  $\pi$ , para poder calcular el coeficiente  $C_n$  el cual esta dado por la siguiente ecuación.

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{\langle T \rangle} x(t) e^{-j(n\omega)t} dt$$

$$C_n = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi |\text{sen}(t)| e^{-j(n\omega)t} dt$$

Siendo  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2$

Quedando  $e^{-j(n\omega)t} = e^{-j2nt} = \cos(2nt) - j \text{sen}(2nt)$

$$C_n = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi |\text{sen}(t)| [\cos(2nt) - j \text{sen}(2nt)] dt$$

$$C_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^\pi \text{sen}(t) \cos(2nt) dt + j \int_0^\pi \text{sen}(t) \text{sen}(2nt) dt \right]$$

Es de importancia saber que  $\int_0^\pi \text{sen}(t) \text{sen}(2nt) dt = 0$

$$C_n = \frac{1}{\pi} \left[ \int_0^\pi \text{sen}(t) \cos(2nt) dt + 0 \right]$$

$$C_n = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left[ \left( \frac{e^{jt} - e^{-jt}}{j2} \right) \cdot \left( \frac{e^{j2nt} + e^{-j2nt}}{2} \right) \right] dt$$

En este paso distribuimos

$$C_n = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left[ \frac{e^{jt(1+2n)}}{j4} + \frac{e^{jt(1-2n)}}{j4} - \frac{e^{-jt(1-2n)}}{j4} - \frac{e^{-jt(1+2n)}}{j4} \right] dt$$

Sacamos factor común y ordenamos

$$C_n = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{1}{j4} \left[ e^{jt(1+2n)} - e^{-jt(1+2n)} - e^{-jt(1-2n)} + e^{jt(1-2n)} \right] dt$$

$$C_n = \frac{1}{j4\pi} \left[ \frac{e^{jt(1+2n)}}{j(1+2n)} \Big|_0^\pi - \frac{e^{-jt(1+2n)}}{-j(1+2n)} \Big|_0^\pi - \frac{e^{-jt(1-2n)}}{-j(1-2n)} \Big|_0^\pi + \frac{e^{jt(1-2n)}}{j(1-2n)} \Big|_0^\pi \right]$$



$$\begin{aligned}
C_n &= \frac{1}{j4\pi} \left[ \frac{e^{j\pi(1+2n)} - 1}{j(1+2n)} + \frac{e^{-j\pi(1+2n)} - 1}{j(1+2n)} + \frac{e^{-j\pi(1-2n)} - 1}{j(1-2n)} + \frac{e^{j\pi(1-2n)} - 1}{j(1-2n)} \right] \\
C_n &= \frac{1}{j4\pi} \left[ \frac{(-1) - 1}{j(1+2n)} + \frac{(-1) - 1}{j(1+2n)} + \frac{(-1) - 1}{j(1-2n)} + \frac{(-1) - 1}{j(1-2n)} \right] \\
C_n &= \frac{1}{j4\pi} \left[ \frac{-2}{j(1+2n)} + \frac{-2}{j(1+2n)} + \frac{-2}{j(1-2n)} + \frac{-2}{j(1-2n)} \right] \\
C_n &= \frac{-2}{j4\pi} \left[ \frac{2}{j(1+2n)} + \frac{2}{j(1-2n)} \right] \\
C_n &= \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{2+2}{(1+2n)(1-2n)} \right] \\
C_n &= \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{4}{1-4n^2} \right] \\
C_n &= \frac{2}{\pi(1-4n^2)}
\end{aligned}$$

Ahora con el coeficiente podemos desarrollar a la señal en su serie

$$\begin{aligned}
x(t) &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} C_n \cdot \phi_n(t) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{2}{\pi(1-4n^2)} \cdot e^{j2nt} \\
x(t) &= \frac{2}{\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{j2nt}}{1-4n^2} \\
x(t) &= \frac{2}{\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\pi} \frac{\cos(2nt)}{1-4n^2}
\end{aligned}$$

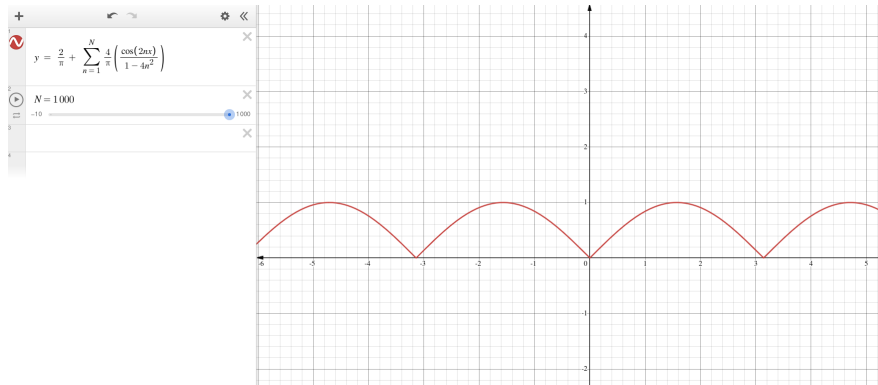


Figura 1.1: Imagen de la señal en su serie

Desarrollando los primeros terminos de la serie obtenemos los siguiente

$$x(t) = \frac{2}{\pi} - \frac{4}{3\pi} \cos(2t) - \frac{4}{15\pi} \cos(4t) - \frac{4}{35\pi} \cos(6t)$$

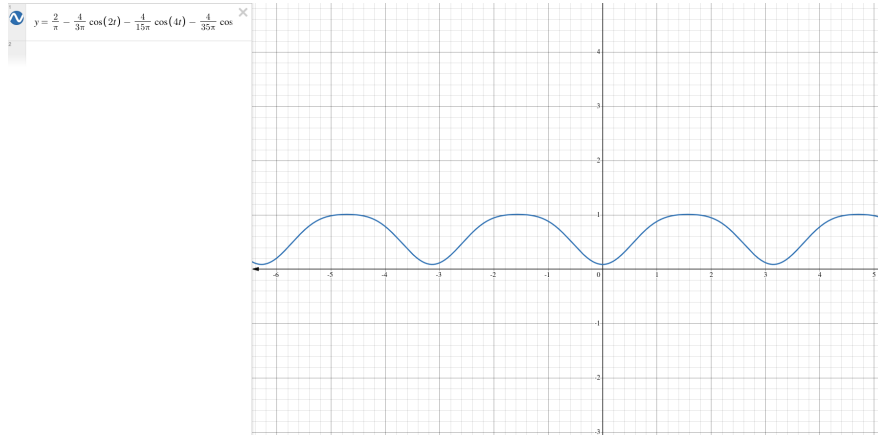


Figura 1.2: Imagen de los primeros terminos de la serie

Para expresar la señal en su segunda forma (la cual si es posible ya que la señal con la que estamos trabajando SI es real) nos es de suma importancia saber si la señal tiene simetría, par, impar o no tiene simetría.

Para que sea par debe cumplir con que  $f(-t) = f(t)$

$$f(-t) = |\text{sen}(-t)| = |-\text{sen}(t)| = |\text{sen}(t)| = f(t)$$

Por lo que verificamos que la señal es par, entonces

$$b_n = 0$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{\langle T \rangle} x(t) dt$$

$$a_0 = \frac{1}{\pi} - \cos(t) \Big|_0^\pi = -\frac{1}{\pi}(-1 - 1) = \frac{2}{\pi}$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{\langle T \rangle} x(t) \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right)$$

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \text{sen}(t) \cos(2nt) dt$$

Anteriormente se realizo el calculo, con la diferencia de tener un 2 en el numerador

$$a_n = \frac{4}{\pi(1 - 4n^2)}$$

$$x(t) = \frac{2}{\pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\pi(1-4n^2)\cos(2nt)}$$

Llegando al mismo resultado obtenido anteriormente. Ahora procederemos a calcular la potencia media de la señal mediante el teorema de Parseval.

$$P_m = \frac{1}{T} \int_{\langle T \rangle} f(t)^2 dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |C_n|^2$$

Lo calcularemos mediante ambos procedimientos y luego verificaremos la semejanza entre ambas alternativas

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

$$P_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{1 - \cos(2t)}{2} dt$$

$$P_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{1}{2} dt - \int_0^{\pi} \cos(2t) dt$$

$$P_m = \frac{1}{\pi} \frac{\pi}{2} = \frac{1}{2}$$

$$P_m = |C_0|^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} |C_n|^2$$

$$|C_0|^2 = \frac{4}{\pi^2}$$

$$|C_n|^2 = \frac{4}{\pi^2(1-4n^2)^2}$$

$$P_m = \frac{4}{\pi^2} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(1-4n^2)^2} \right]$$

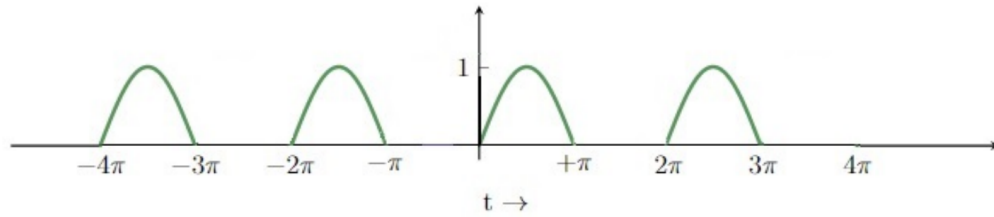
Desarrollando 4 terminos de la serie

$$P_m = \frac{4}{\pi^2} \left[ 1 + 2 \left( \frac{1}{9} + \frac{1}{225} + \frac{1}{1225} + \frac{1}{3969} \right) \right]$$

$$P_m = 0,499816$$

Verificando que el valor obtenido por ambas alternativas es el mismo, con una aproximación mediante la serie del 99,962 %

## Señal sinusoidal rectificada de media onda



$$C_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-jn\omega_0 t} dt$$

$$C_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sin(t) e^{-jn\omega t} dt + \int_\pi^{2\pi} \sin(t) e^{-jn\omega t} dt$$

En el gráfico de la función se puede observar que solamente existe entre los valores 0 y  $\pi$  en cambio entre  $\pi$  y  $2\pi$  vale 0, por ende integrarlo vale 0.

$$C_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left( \frac{e^{jt} - e^{-jt}}{2j} \right) e^{-jnt} dt$$

$$C_n = \frac{1}{j4\pi} \left[ \int_0^\pi e^{jt(1-n)} dt - \int_0^\pi e^{-jt(1+n)} dt \right]$$

$$C_n = \frac{1}{j4\pi} \left[ \frac{e^{jt(1-n)}}{j(1-n)} \Big|_0^\pi - \frac{e^{-jt(1+n)}}{-j(1+n)} \Big|_0^\pi \right]$$

$$C_n = \frac{1}{j4\pi} \left[ \frac{1}{j} \frac{e^{j\pi(1-n)} - 1}{(1-n)} + \frac{e^{-j\pi(1+n)} - 1}{(1+n)} \right]$$

$$e^{j\pi(1-n)} = e^{j\pi} e^{-jn\pi} = -(-1)^n$$

$$e^{-j\pi(1+n)} = e^{-j\pi} e^{-jn\pi} = -(-1)^n$$

$$C_n = -\frac{1}{4\pi} \left[ \frac{-((-1)^n + 1)}{1-n} + \frac{-((-1)^n + 1)}{1+n} \right]$$

$$C_n = \frac{(-1)^n + 1}{4\pi} \left( \frac{1}{1-n} + \frac{1}{1+n} \right)$$

$$\frac{1}{1-n} + \frac{1}{1+n} = \frac{-2}{(n^2 - 1)}$$

$$C_n = -\frac{(-1)^n + 1}{2\pi(n^2 - 1)}$$

Para todo  $n$  impar  $C_n = 0$  excepto en  $\pm 1$ , en  $n = 1$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left( \frac{e^{jt} - e^{-jt}}{2j} \right) e^{-jt} dt$$

$$C_1 = \frac{1}{j4\pi} \int_0^\pi \left( 1 - e^{-2jt} \right) dt$$

$$C_1 = \frac{1}{j4\pi} \left[ \pi + \frac{e^{-2j\pi} - 1}{2j} \right]$$

$$C_1 = -\frac{j}{4}$$

Para el caso de  $n = -1$

$$C_{-1} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left( \frac{e^{jt} - e^{-jt}}{2j} \right) e^{jt} dt$$

$$C_{-1} = \frac{1}{j4\pi} \int_0^\pi \left( e^{2jt} - 1 \right) dt$$

$$C_{-1} = \frac{1}{j4\pi} \left[ \left( \frac{e^{2jt}}{2j} - t \right) \Big|_0^\pi \right]$$

$$C_{-1} = \left[ \frac{e^{2jt}}{8\pi} \Big|_0^\pi \right] - \left[ \frac{-t}{j4\pi} \Big|_0^\pi \right]$$

$$C_{-1} = 0 - \frac{1}{j4}$$

$$C_{-1} = \frac{j}{4}$$

$$x(t) =$$

Ahora para el cálculo de los coeficientes  $a_n$  y  $b_n$  simplemente debemos conocer la matriz de cambio de base la cual es  $a_0 = C_0$ ,  $a_n = 2\text{Re}(C_n)$ ,  $b_n = -2\text{Im}(C_n)$ .

$$a_0 = \frac{1}{\pi}$$

$$a_n = \begin{cases} 0 & \forall n \text{ impar} \\ \frac{2}{\pi(1-n^2)} & \forall n \text{ par} \end{cases}$$

$$b_n = \begin{cases} \frac{1}{2} & n = 1 \\ 0 & \forall n > 1 \end{cases}$$

Ahora podemos escribir a  $x(t)$  desarrollando los primeros valores de la serie

$$x(t) = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2}\text{sen}(t) + \frac{2}{\pi} \left[ -\frac{1}{3}\cos(2t) - \frac{1}{15}\cos(4t) - \frac{1}{35}\cos(6t) \right]$$

Procederemos a calcular la potencia media

$$P_m = \frac{1}{T} \int_{\langle T \rangle} x(t) dt$$

$$P_m = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \text{sen}(t)^2 dt$$

$$P_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\pi}{2}$$

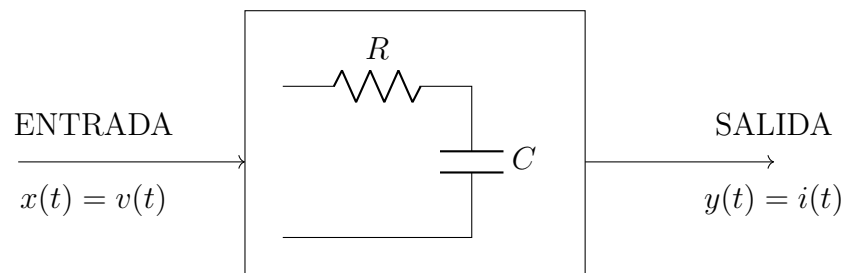
$$P_m = \frac{1}{4}$$

## Ejercicio 2

### Actividad 1

#### A

A) Expresar la Ecuación Diferencial (ED) que describe el circuito, y con ello, definir un sistema en tiempo continuo con entrada  $x(t) = v(t)$  y salida  $y(t) = i(t)$ , con condiciones iniciales genérica.



Para plantear la EDO es necesario plantear ley de kirchoff

$$v(t) = R \cdot i(t) + \frac{1}{C} \cdot \int i(t) dt$$

Ahora derivamos para conseguir la expresión buscada

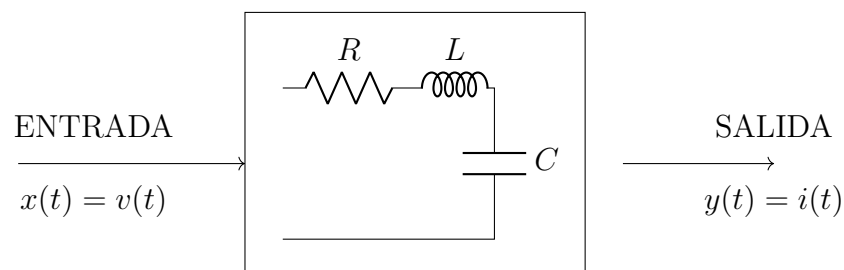
$$\frac{dv(t)}{dt} = R \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot i(t)$$

Dividimos todo por  $R$  para normalizar la ecuación

$$\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{RC} \cdot i(t) = \frac{1}{R} \cdot \frac{dv(t)}{dt}$$

$$y'(t) + \frac{1}{RC} \cdot y(t) = \frac{1}{R} \cdot x'(t)$$

Para el circuito de segundo orden:



Siguiendo con el mismo procedimiento

$$v(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int i(t) dt$$

$$\frac{dv(t)}{dt} = R \cdot \frac{di(t)}{dt} + L \cdot \frac{d^2i(t)}{dt^2} + \frac{1}{C} \cdot i(t)$$

$$\frac{d^2i(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{LC} \cdot i(t) = \frac{1}{L} \cdot \frac{dv(t)}{dt}$$

$$y''(t) + \frac{R}{L} \cdot y'(t) + \frac{1}{LC} \cdot y(t) = \frac{1}{L} \cdot x'$$

## B

**B)** Usar la transformada de Laplace para sintetizar el sistema en la expresión  
Primero sintetizamos la ecuación correspondiente al circuito de primer orden

$$\mathcal{L}[y'(t)] = sY(s) - y(0)$$

$$\mathcal{L}[y(t)] = Y(s)$$

$$\mathcal{L}[x'(t)] = sX(s) - x(0)$$

Quedando

$$sY(s) - y(0) + \frac{1}{RC} \cdot Y(s) = \frac{1}{R} \cdot (sX(s) - x(0))$$

$$Y(s)(s + \frac{1}{RC}) = \frac{1}{R} \cdot sX(s) - \frac{1}{R}x(0) + y(0)$$

$$Y(s) = X(s) \frac{\frac{s}{R}}{s + \frac{1}{RC}} + \frac{1}{(s + \frac{1}{RC})} [y(0) - x(0) \frac{1}{R}]$$

Ya nos queda sintetizado a la expresión

$$Y(s) = X(s) \cdot H(s) + F(s, CI)$$

Ahora para el circuito de segundo orden, primero debemos definir la transformada para la segunda derivada

$$\mathcal{L}[y''(t)] = s^2Y(s) - sy(0) - y'(0)$$

Quedando la ecuación sintetizada



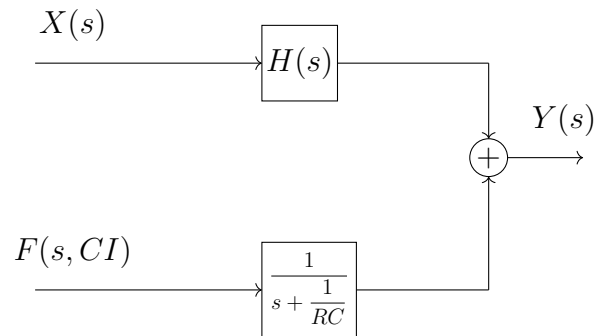
$$s^2Y(s) - sy(0) - y'(0) + \frac{R}{L}(sY(s) - y(0)) + \frac{1}{LC} \cdot Y(s) = \frac{1}{L} \cdot (sX(s) - x(0))$$

$$Y(s)(s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}) = X(s)\frac{s}{L} - x(0)\frac{1}{L} + sy(0) + y'(0) + \frac{R}{L}y(0)$$

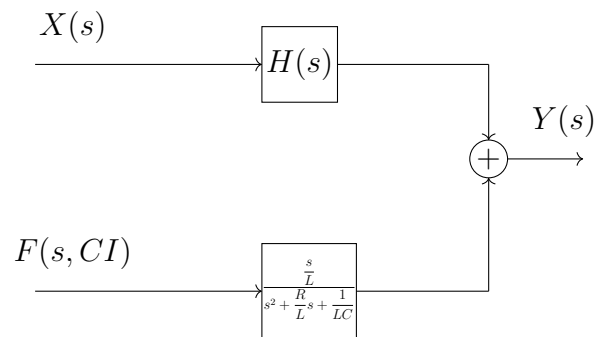
$$Y(s) = X(s) \frac{\frac{s}{L}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} + \frac{1}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} [sy(0) + y'(0) + \frac{R}{L}y(0) - x(0)\frac{1}{L}]$$

**C**

C) Escribir un diagrama de bloques en la variable compleja S que determine al sistema. El diagrama de bloques que describe a la ecuación de primer orden es:



Por otro lado el que describe a la ecuación de segundo orden



**D**

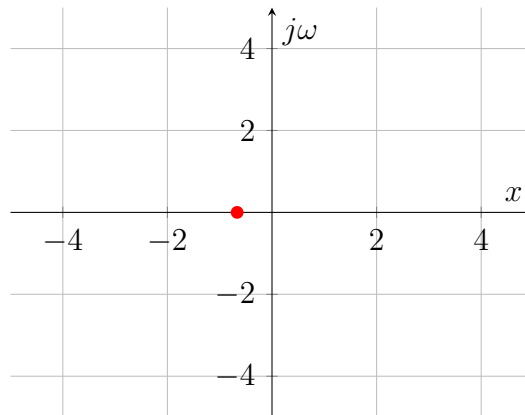
D) Graficar en el plano S polos y ceros de  $H(s)$ .  
Para el caso de primer orden

$$H(s) = \frac{\frac{s}{L}}{s + \frac{1}{RC}}$$

Donde el único polo se encuentra en  $s = -\frac{1}{RC}$  y el cero en  $s = 0$ .

$$R = 3, C = \frac{1}{2}, L = 1.$$

El polo con estos datos sería  $s = -\frac{2}{3}$



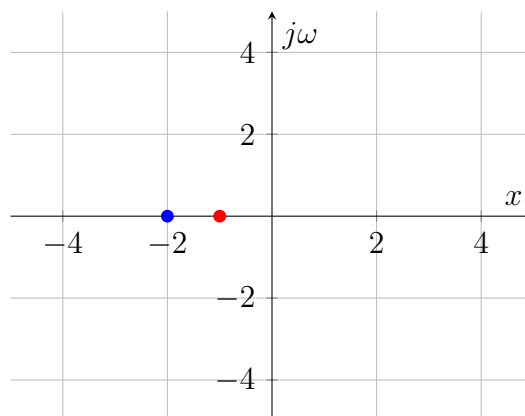
Para la ecuación de segundo orden

$$H(s) = \frac{\frac{s}{L}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}}$$

Y los polos se encontrarían en

$$s_n = \frac{-\frac{R}{L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{L} - \frac{4}{LC}}}{2}$$

Donde reemplazando con los valores previamente dados, los polos quedarían en  $(-1, 0)$  y  $(-2, 0)$ .



**E**

**E)** Obtener la respuesta al impulso,  $h(t)$ , suponiendo que las CI = 0.  
Continuaremos resolviendo primero la ecuación de primer orden

$$\mathcal{L}[\delta(t)] = 1$$

$$\mathcal{L}^{-1}[H(s) \cdot 1] = \mathcal{L}^{-1}[H(s)]$$

$$H(s) = \frac{1}{R} \frac{s}{s + \frac{1}{RC}}$$

$$\frac{1}{RC} = a$$

$$H(s) = \frac{1}{R} \frac{s + a - a}{s + a}$$

$$H(s) = \frac{1}{R} \left( \frac{s + a}{s + a} - \frac{a}{s + a} \right)$$

$$H(s) = \frac{1}{R} \left( 1 - \frac{a}{s + a} \right)$$

$$h(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[ \frac{1}{R} \left( 1 - \frac{a}{s + a} \right) \right] = \frac{1}{R} \mathcal{L}^{-1} \left[ 1 - \frac{a}{s + a} \right] = \frac{1}{R} (\mathcal{L}^{-1}[1] - \mathcal{L}^{-1}[\frac{a}{s + a}])$$

$$\mathcal{L}^{-1}[1] = \delta(t)$$

$$\mathcal{L}^{-1}[\frac{a}{s + a}] = ae^{-at}u(t)$$

$$h(t) = \frac{1}{R} (\delta(t) - ae^{at}u(t))$$

$$h(t) = \frac{1}{R} (\delta(t) - \frac{1}{RC} e^{\frac{1}{RC}t} u(t))$$

$$h(t) = \frac{\delta(t)}{3} - \frac{2}{9} e^{\frac{2}{3}t} u(t)$$

Para la ecuación de segundo orden

$$H(s) = \frac{\frac{s}{L}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}}$$

$$\frac{R}{L} = a; \frac{1}{LC} = b$$

$$H(s) = \frac{1}{L} \frac{s}{s^2 + as + b}$$

$$H(s) = \frac{1}{L} \frac{s}{(s+1)(s+2)}$$

$$H(s) = \frac{1}{L} \frac{-1}{s+1} + \frac{2}{s+2}$$

$$h(t) = \mathcal{L}^{-1}[H(s)] = \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{1}{L} \frac{-1}{s+1} + \frac{2}{s+2}\right]$$

$$h(t) = \frac{1}{L} \mathcal{L}^{-1}\left[\frac{-1}{s+1} + \frac{2}{s+2}\right]$$

$$h(t) = \frac{1}{L} \left( -\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s+1}\right) + \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{2}{s+2}\right) \right)$$

$$h(t) = \frac{1}{L} (-e^{-t}u(t) + 2e^{-2t}u(t))$$

$$h(t) = \frac{1}{L} u(t) (-e^{-t} + 2e^{-2t})$$

## F

**F)** Obtener la respuesta al escalón unitario  $v(t)$ , suponiendo  $CI = 0$  y verificar la identidad  $\frac{d}{dt}v(t) = h(t), \forall t$ .

Para la ecuación de primer orden

$$v(t) = \mathcal{L}^{-1}(H(s) \cdot \mathcal{L}(u(t)))$$

$$v(t) = \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{\frac{s}{R}}{s + \frac{1}{RC}} \cdot \frac{1}{s}\right)$$

$$v(t) = \frac{1}{R} \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s + \frac{1}{RC}}\right)$$

$$\frac{1}{RC} = a$$

$$v(t) = \frac{1}{R} \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s+a}\right)$$

$$v(t) = \frac{1}{R} e^{-at} u(t)$$

$$v(t) = \frac{1}{3} e^{-\frac{2}{3}t} u(t)$$

En el caso de la de segundo orden

$$v(t) = \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{\frac{s}{L}}{s(s+1)(s+2)}\right)$$

$$v(t) = \frac{1}{L} \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{(s+1)(s+2)}\right)$$

Por fracciones simples

$$v(t) = \frac{1}{L} \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{A}{s+1} \frac{B}{s+2}\right)$$

$$v(t) = \frac{1}{L} \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s+1} - \frac{1}{s+2}\right)$$

$$v(t) = \frac{1}{L} \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s+1}\right) - \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s+2}\right)$$

$$v(t) = \frac{1}{L} (e^{-t} - e^{-2t}) u(t)$$

$$L = 1$$

$$v(t) = (e^{-t} - e^{-2t}) u(t)$$

Ahora para ambos casos vamos a verificar que  $\frac{dv(t)}{dt} = h(t)$

En ambos casos vamos a usar que  $\frac{d}{dt}[f(t)u(t)] = f(0)\delta(t) + f'(t)u(t)$ , siendo para la ecuación de primer orden

$$v(0) = \frac{1}{3}$$

$$v'(t) = \frac{-2}{9} e^{-\frac{2}{3}t}$$

Quedando

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{\delta(t)}{3} - \frac{2}{9} e^{-\frac{2}{3}t} u(t)$$

Por lo cual se verifica para la primera ecuación, por otro lado para la de segundo grado

$$v(0) = e^{-0} - e^0 = 1 - 1 = 0$$

$$v'(t) = e^{-t} + 2e^{-2t}$$

Lo cual aplicando lo explicado anteriormente

$$\frac{dv(t)}{dt} = 0\delta(t) + e^{-t} + 2e^{-2t}u(t)$$

$$\frac{dv(t)}{dt} = e^{-t} + 2e^{-2t}u(t) = h(t)$$

## G

**G)** Obtener la respuesta a la rampa.

Primero transformamos la integral del escalón

$$\mathcal{L}\left(\int_{-\infty}^t u(\tau)d\tau\right)$$

$$\mathcal{L}\left(\int_{-\infty}^0 0d\tau + \int_0^t 1d\tau\right)$$

$$\mathcal{L}(t)$$

$$\mathcal{L}(t) = \frac{1}{s^2}$$

Entonces para calcular la respuesta a la rampa con la ecuación de primer orden

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}\left(H(s)\frac{1}{s^2}\right)$$

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1}\left(\frac{\frac{s}{R}}{s + \frac{1}{RC}} \cdot \frac{1}{s^2}\right)$$

$$y(t) = \frac{1}{R}\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{1}{s(s + \frac{1}{RC})}\right)$$

$$\frac{1}{RC} = \frac{2}{3} = a$$

$$y(t) = \frac{1}{R}\mathcal{L}^{-1}\left(\frac{A}{s} + \frac{B}{s+a}\right)$$

$$A = \frac{1}{a}; B = -\frac{1}{a}$$

$$y(t) = \frac{1}{R} \frac{1}{a} \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{1}{s} - \frac{1}{s+a} \right)$$

$$y(t) = \frac{1}{R} \frac{1}{a} \left( \mathcal{L}^{-1} \frac{1}{s} - \mathcal{L}^{-1} \frac{1}{s+a} \right)$$

$$y(t) = \frac{1}{R} \frac{1}{a} (u(t) - e^{-at} u(t))$$

$$y(t) = \frac{1}{aR} u(t) (1 - e^{-at})$$

$$y(t) = C u(t) (1 - e^{-\frac{1}{RC} t})$$

$$y(t) = \frac{1}{2} u(t) (1 - e^{-\frac{2}{3} t})$$

Para el caso de la ecuación de segundo orden, recordamos que

$$H(s) = \frac{\frac{s}{\bar{L}}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}}$$

$$y(t) = \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{\frac{s}{\bar{L}}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \cdot \frac{1}{s^2} \right)$$

$$y(t) = \frac{1}{L} \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{1}{s(s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC})} \right)$$

$$y(t) = \frac{1}{L} \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{1}{s(s+1)(s+2)} \right)$$

$$y(t) = \frac{1}{L} \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{A}{s} + \frac{B}{s+1} + \frac{C}{s+2} \right)$$

$$y(t) = \frac{1}{L} \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{\frac{1}{2}}{s} - \frac{1}{s+1} + \frac{\frac{1}{2}}{s+2} \right)$$

$$y(t) = \frac{1}{L} \left[ \frac{1}{2} \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{1}{s} \right) - \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{1}{s+1} \right) + \frac{1}{2} \mathcal{L}^{-1} \left( \frac{1}{s+2} \right) \right]$$

$$y(t) = \frac{1}{L} \left[ \frac{1}{2} u(t) - e^{-t} u(t) + \frac{1}{2} e^{-2t} u(t) \right]$$

$$y(t) = \frac{1}{L} u(t) \left[ \frac{1}{2} - e^{-t} + \frac{e^{-2t}}{2} \right]$$

$$L = 1$$

$$y(t) = u(t) \left[ \frac{1}{2} - e^{-t} + \frac{e^{-2t}}{2} \right]$$

Vamos a completar este ejercicio realizando la verificación de los cálculos mediante la siguiente igualdad  $y(t) = \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau$ .

Manteniendo el orden de realización de ejercicios, comenzamos con la ecuación de primer orden

$$v(t) = \frac{1}{3} e^{-\frac{2}{3}t} u(t)$$

$$\int_{-\infty}^t v(t) = \frac{1}{3} \int_0^t e^{-\frac{2}{3}\tau} d\tau = y(t)$$

$$a = \frac{-2}{3}$$

$$y(t) = \frac{1}{3} \left[ \frac{1}{a} e^{at} \right]_0^t$$

$$y(t) = \frac{1}{3} \frac{1}{a} (e^{at} - 1)$$

$$y(t) = -\frac{1}{2} e^{-\frac{2}{3}t} - \frac{1}{2}$$

$$y(t) = \frac{1}{2} (1 - e^{-\frac{2}{3}t})$$

Verificando correctamente para la primera ecuación, ahora correspondemos con la de segundo orden

$$v(t) = (e^{-t} - e^{-2t}) u(t)$$

$$\int_{-\infty}^t v(t) = y(t)$$

$$\int_{-\infty}^t v(t) = \int_0^t (e^{-\tau} - e^{-2\tau}) d\tau$$



$$\int_{-\infty}^t v(t) = \int_0^t e^{-\tau} d\tau - \int_0^t e^{-2\tau} d\tau$$

$$\int_{-\infty}^t v(t) = -e^{-\tau} \Big|_0^t - \left( -\frac{1}{2} e^{-2\tau} \Big|_0^t \right)$$

$$\int_{-\infty}^t v(t) = -(e^{-t} - 1) - \left( -\frac{1}{2} e^{-2t} + \frac{1}{2} \right)$$

$$\int_{-\infty}^t v(t) = 1 - e^{-t} + \frac{1}{2} e^{-2t} - \frac{1}{2}$$

$$\int_{-\infty}^t v(t) = \frac{1}{2} - e^{-t} + \frac{1}{2} e^{-2t}$$

Su forma causal

$$\int_{-\infty}^t v(t) = u(t) \left[ \frac{1}{2} - e^{-t} + \frac{1}{2} e^{-2t} \right]$$

Por lo cual, se verifica todo lo calculado anteriormente.

## Actividad 2

### A

#### Circuito RC

De la Ley de Voltajes de Kirchhoff y la relación del capacitor:

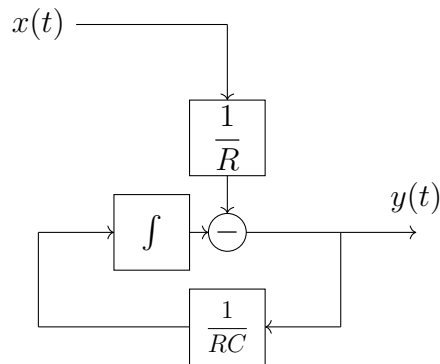
$$v(t) = Ri(t) + v_C(t), \quad i(t) = C v'_C(t) \Rightarrow v'_C(t) = \frac{1}{C} y(t).$$

La ecuación diferencial queda:

$$y'(t) + \frac{1}{RC} y(t) = \frac{1}{R} x'(t)$$

$$Dy(t) + \frac{1}{RC} y(t) = \frac{1}{R} Dx(t)$$

$$y(t) = \frac{1}{R} x(t) - D^{-1} \left( \frac{1}{RC} y(t) \right)$$



### Circuito RLC

De la Ley de Voltajes de Kirchhoff y la relación de los elementos (RLC):

$$x(t) = R i(t) + L i'(t) + v_C(t), \quad i(t) = C v'_C(t).$$

La ecuación diferencial queda:

$$y''(t) + \frac{R}{L} y'(t) + \frac{1}{LC} y(t) = \frac{1}{L} x'(t).$$

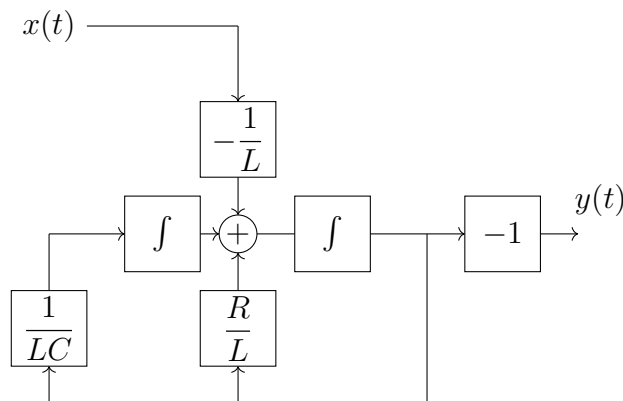
$$D^2 y(t) + D \left[ \frac{R}{L} y(t) \right] + \frac{1}{LC} y(t) = D \left[ \frac{1}{L} x(t) \right]$$

$$D^2 y(t) = D \left[ \frac{1}{L} x(t) - \frac{R}{L} y(t) \right] - \frac{1}{LC} y(t)$$

$$y(t) = D^{-1} \left[ \frac{1}{L} x(t) - \frac{R}{L} y(t) \right] - D^{-2} \frac{1}{LC} y(t)$$

$$y(t) = D^{-1} \left[ \frac{1}{L} x(t) - \frac{R}{L} y(t) - D^{-1} \left( \frac{1}{LC} y(t) \right) \right]$$

$$-y(t) = D^{-1} \left[ -\frac{1}{L} x(t) + \frac{R}{L} y(t) + D^{-1} \left( \frac{1}{LC} y(t) \right) \right]$$



**B****Circuito RC****Función de transferencia e impulso**

$$H(s) = \frac{\frac{s}{R}}{s + \frac{1}{RC}}.$$

$$h(t) = \mathcal{L}^{-1}\{H(s)\} = \frac{1}{R} \left[ \delta(t) - \frac{1}{RC} e^{-t/(RC)} u(t) \right].$$

**Respuesta al escalón**

Entrada:

$$x(t) = u(t), \quad X(s) = \frac{1}{s}.$$

$$Y(s) = H(s) X(s) = \frac{\frac{s}{R}}{s + \frac{1}{RC}} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{RC}}.$$

$$y(t) = \frac{1}{R} e^{-t/(RC)} u(t).$$

Verificación con convolución en tiempo:

$$\begin{aligned} v(t) &= \int_0^t h(\tau) d\tau \\ &= \frac{1}{R} \left( \int_0^t \delta(\tau) d\tau - \frac{1}{RC} \int_0^t e^{-\tau/(RC)} d\tau \right) \\ &= \frac{1}{R} (1 - (1 - e^{-t/(RC)})) \\ &= \frac{1}{R} e^{-t/(RC)} u(t). \end{aligned}$$

**Respuesta a la rampa**

Entrada:

$$x(t) = t u(t), \quad X(s) = \frac{1}{s^2}.$$

$$Y(s) = H(s) X(s) = \frac{\frac{s}{R}}{s + \frac{1}{RC}} \cdot \frac{1}{s^2} = \frac{1}{R} \frac{1}{s(s + \frac{1}{RC})}.$$

Descomposición en fracciones simples:

$$\frac{1}{s(s + \frac{1}{RC})} = \frac{RC}{s} - \frac{RC}{s + \frac{1}{RC}}.$$

$$Y(s) = \frac{1}{R} \left( \frac{RC}{s} - \frac{RC}{s + \frac{1}{RC}} \right).$$

$$y(t) = C(1 - e^{-t/(RC)})u(t).$$

**Ciruito RLC****Función de transferencia e impulso**

$$H(s) = \frac{\frac{s}{L}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} = \frac{1}{L} \frac{s}{(s - s_1)(s - s_2)}$$

Con

$$s_{1,2} = \frac{-\frac{R}{L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{LC}}}{2}; \quad s_1 \neq s_2$$

Descomposición en fracciones simples:

$$\frac{s}{(s - s_1)(s - s_2)} = \frac{s_1}{s_1 - s_2} \cdot \frac{1}{s - s_1} - \frac{s_2}{s_1 - s_2} \cdot \frac{1}{s - s_2}$$

$$h(t) = \frac{1}{L} \left( \frac{s_1}{s_1 - s_2} e^{s_1 t} - \frac{s_2}{s_1 - s_2} e^{s_2 t} \right) u(t)$$

**Respuesta al escalón**

Entrada:

$$x(t) = u(t), \quad X(s) = \frac{1}{s}.$$

$$Y(s) = H(s) X(s) = \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{(s - s_1)(s - s_2)}$$

$$\frac{1}{(s - s_1)(s - s_2)} = \frac{1}{s_1 - s_2} \left( \frac{1}{s - s_1} - \frac{1}{s - s_2} \right)$$

$$Y(s) = \frac{1}{L(s_1 - s_2)} \left( \frac{1}{s - s_1} - \frac{1}{s - s_2} \right)$$

$$y(t) = \frac{1}{L(s_1 - s_2)} (e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) u(t)$$

**Respuesta a la rampa**

Entrada:

$$x(t) = t u(t), \quad X(s) = \frac{1}{s^2}$$

$$Y(s) = H(s) X(s) = \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{s(s - s_1)(s - s_2)}$$

Descomposición en fracciones simples:

$$\frac{1}{s(s - s_1)(s - s_2)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s - s_1} + \frac{C}{s - s_2}$$

Determinando coeficientes:

$$A = \frac{1}{s_1 s_2} = LC \quad B = \frac{1}{s_1(s_1 - s_2)} \quad C = \frac{1}{s_2(s_2 - s_1)}$$

$$Y(s) = \frac{1}{L} \left( \frac{LC}{s} + \frac{1}{s_1(s_1 - s_2)} \frac{1}{s - s_1} + \frac{1}{s_2(s_2 - s_1)} \frac{1}{s - s_2} \right)$$

$$y(t) = C u(t) + \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{s_1 - s_2} \left( \frac{e^{s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{s_2 t}}{s_2} \right) u(t)$$

### Numéricamente

Si  $R = 3$ ,  $L = 1$ ,  $C = \frac{1}{2}$ , entonces  $s_1 = -1$ ,  $s_2 = -2$ . Se obtiene:

$$h(t) = (-e^{-t} + 2e^{-2t})u(t)$$

$$y(t) = (e^{-t} - e^{-2t})u(t)$$

$$y(t) = \left( \frac{1}{2} - e^{-t} + \frac{1}{2}e^{-2t} \right) u(t)$$

## C

### Circuit RC

Datos:

$$H(s) = \frac{\frac{s}{R}}{s + \frac{1}{RC}}, \quad h(t) = \frac{1}{R} \left[ \delta(t) - \frac{1}{RC} e^{-t/(RC)} u(t) \right]$$

**Entrada escalón:**  $x(t) = u(t)$ ,  $X(s) = \frac{1}{s}$

$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{RC}} \Rightarrow y(t) = \frac{1}{R} e^{-t/(RC)} u(t)$$

**TVI/TVF en  $s$ :**

$$\text{TVI: } y(0^+) = \lim_{s \rightarrow \infty} [s Y(s)] = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{s}{R(s + \frac{1}{RC})} = \frac{1}{R}$$

$$\text{TVF: } y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} [s Y(s)] = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s}{R(s + \frac{1}{RC})} = 0$$

**Verificación en  $t$ :**

$$y(0^+) = \frac{1}{R} e^0 = \frac{1}{R}, \quad y(\infty) = \frac{1}{R} e^{-\infty} = 0$$

**Conclusiones:** Se comprobó que los resultados obtenidos con el TVI y el TVF en el dominio de Laplace coinciden con los límites directos de las soluciones en el dominio temporal.

- Para una **entrada escalón**, la corriente arranca en  $\frac{1}{R}$  y decae a cero, mostrando que el capacitor bloquea el paso en estado estacionario (comportamiento de circuito abierto en DC).
- Para una **entrada rampa**, la salida arranca en cero y tiende a un valor constante  $C$ , reflejando la acumulación de carga en el capacitor y confirmando el rol de éste como integrador de señales de baja frecuencia.

**Entrada rampa:**  $x(t) = t u(t)$ ,  $X(s) = \frac{1}{s^2}$ .

$$Y(s) = H(s)X(s) = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{s(s + \frac{1}{RC})} = \frac{1}{R} \left( \frac{RC}{s} - \frac{RC}{s + \frac{1}{RC}} \right)$$

$$y(t) = \frac{1}{R} (RC u(t) - RC e^{-t/(RC)} u(t)) = C(1 - e^{-t/(RC)}) u(t)$$

**TVI/TVF en  $s$ :**

$$\text{TVI: } y(0^+) = \lim_{s \rightarrow \infty} [s Y(s)] = \lim_{s \rightarrow \infty} C \left( 1 - \frac{s}{s + \frac{1}{RC}} \right) = 0$$

$$\text{TVF: } y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} [s Y(s)] = \lim_{s \rightarrow 0} C \left( 1 - \frac{s}{s + \frac{1}{RC}} \right) = C$$

**Verificación en  $t$ :**

$$y(0^+) = C(1 - 1) = 0, \quad y(\infty) = C(1 - 0) = C.$$

**Circuito RLC**

**Datos:**

$$H(s) = \frac{\frac{s}{L}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} = \frac{1}{L} \frac{s}{(s - s_1)(s - s_2)} \quad s_{1,2} = \frac{-\frac{R}{L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{L}\right)^2 - \frac{4}{LC}}}{2}$$

$$h(t) = \frac{1}{L} \left( \frac{s_1}{s_1 - s_2} e^{s_1 t} - \frac{s_2}{s_1 - s_2} e^{s_2 t} \right) u(t)$$

(Suponemos estabilidad:  $\Re\{s_1\}, \Re\{s_2\} < 0$ .)

**Entrada escalón:**  $x(t) = u(t)$ ,  $X(s) = \frac{1}{s}$

$$Y(s) = \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{(s - s_1)(s - s_2)} = \frac{1}{L(s_1 - s_2)} \left( \frac{1}{s - s_1} - \frac{1}{s - s_2} \right)$$

$$y(t) = \frac{1}{L(s_1 - s_2)} (e^{s_1 t} - e^{s_2 t}) u(t)$$

**TVI/TVF en  $s$ :**

$$\text{TVI: } y(0^+) = \lim_{s \rightarrow \infty} [s Y(s)] = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{s}{L} \cdot \frac{1}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} = 0$$

$$\text{TVF: } y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} [s Y(s)] = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s}{L} \cdot \frac{1}{(s - s_1)(s - s_2)} = 0$$

**Verificación en  $t$ :**

$$y(0^+) = \frac{1}{L(s_1 - s_2)} (1 - 1) = 0, \quad y(\infty) = \frac{1}{L(s_1 - s_2)} (0 - 0) = 0.$$

**Entrada rampa:**  $x(t) = t u(t)$ ,  $X(s) = \frac{1}{s^2}$

$$Y(s) = \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{s(s-s_1)(s-s_2)}$$

Reordenando:

$$\frac{1}{s(s-s_1)(s-s_2)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s-s_1} + \frac{C}{s-s_2}$$

$$A = \frac{1}{s_1 s_2} = LC \quad B = \frac{1}{s_1(s_1-s_2)} \quad C = \frac{1}{s_2(s_2-s_1)}$$

Entonces

$$Y(s) = \frac{1}{L} \left( \frac{LC}{s} + \frac{B}{s-s_1} + \frac{C}{s-s_2} \right) \Rightarrow y(t) = C u(t) + \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{s_1-s_2} \left( \frac{e^{s_1 t}}{s_1} - \frac{e^{s_2 t}}{s_2} \right) u(t)$$

**TVI/TVF en  $s$ :**

$$\text{TVI: } y(0^+) = \lim_{s \rightarrow \infty} [s Y(s)] = \lim_{s \rightarrow \infty} \frac{s}{L} \cdot \frac{1}{s^3 + \dots} = 0$$

$$\text{TVF: } y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} [s Y(s)] = \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{(0-s_1)(0-s_2)} = \frac{1}{L s_1 s_2} = C$$

**Verificación en  $t$ :**

$$y(0^+) = C + \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{s_1-s_2} \left( \frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2} \right) = C - \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{s_1 s_2} = C - C = 0$$

$$y(\infty) = C + \frac{1}{L} \cdot \frac{1}{s_1-s_2} \left( \frac{0}{s_1} - \frac{0}{s_2} \right) = C.$$

**Conclusiones:** También se verificó que los valores de TVI y TVF en el dominio  $s$  coinciden con los obtenidos a partir de las expresiones en el tiempo. - Para una **entrada escalón**, tanto el valor inicial como el final de la salida resultan nulos, lo que significa que, en régimen permanente, la corriente en el lazo desaparece (el capacitor se opone en DC y el inductor en régimen inicial). - Para una **entrada rampa**, la salida comienza en cero y tiende al valor  $C$ , mostrando que la combinación  $RLC$  termina limitando el crecimiento de la corriente y fijando un valor estacionario dependiente de la capacitancia.

## D

### Circuit RC

Partiendo de la ED del circuito RC en serie:

$$y'(t) + \frac{1}{RC} y(t) = \frac{1}{R} x'(t).$$

**Ecuación característica:** Considerando la ecuación homogénea asociada (es decir,  $x(t) = 0$ ):

$$y'(t) + \frac{1}{RC} y(t) = 0.$$

La solución característica se obtiene de:

$$s + \frac{1}{RC} = 0 \Rightarrow s = -\frac{1}{RC}.$$

**Orden del sistema:** La ecuación característica es un polinomio de primer grado en  $s$ . Por lo tanto, el sistema tiene un único polo real negativo, y es un sistema de **primer orden**.

**Coefficiente de amortiguamiento  $\xi$ :** El coeficiente de amortiguamiento  $\xi$  se define a partir de la forma canónica de un sistema de **segundo orden**:

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0,$$

donde aparecen dos polos que pueden ser reales o complejos. En el caso RC, como solo existe un polo, no es posible definir  $\xi$ .

**Parámetro característico del sistema:** En lugar de  $\xi$ , el RC queda caracterizado por su constante de tiempo:

$$\tau = RC,$$

la cual determina tanto la velocidad de respuesta como la localización del polo:

$$s = -\frac{1}{\tau}.$$

**Conclusión:** El circuito RC es de primer orden, posee un único polo real negativo y se describe completamente mediante su constante de tiempo  $RC$ . El coeficiente de amortiguamiento  $\xi$  solo aplica en sistemas de segundo orden, por lo que no se puede definir para este caso.

**Circuito RLC** Partiendo de la ecuación diferencial normalizada obtenida:

$$y''(t) + \frac{R}{L} y'(t) + \frac{1}{LC} y(t) = \frac{1}{L} x'(t),$$

la ecuación característica es

$$s^2 + \frac{R}{L} s + \frac{1}{LC} = 0.$$

Comparando con la forma estándar de segundo orden

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0,$$

se identifica

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad 2\xi\omega_n = \frac{R}{L}.$$

Luego, el **coeficiente de amortiguamiento** resulta

$$\xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$



**Clasificación según  $\xi$ :**

$\xi < 1$  subamortiguado (polos complejos conjugados,  $\Re\{s\} < 0$ )

$\xi = 1$  críticamente amortiguado (polo doble real negativo)

$\xi > 1$  sobreamortiguado (dos polos reales negativos distintos)

**Numéricamente (como en A1/B):** si  $R = 3$ ,  $L = 1$ ,  $C = \frac{1}{2}$ :

$$\xi = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{1}{2}} \approx 1.0607 > 1$$

lo cual coincide con el caso *sobreamortiguado* y con los polos reales distintos  $s_1 = -1$ ,  $s_2 = -2$ .

**E**

**Circuito RC** El circuito es de **primer orden**; por lo que no posee frecuencia natural  $\omega_n$  contrastando con el inciso anterior se deduce tal afirmación. El parámetro característico es la constante de tiempo

$$\tau = RC,$$

**Interpretación de  $1/\tau$  en un circuito RC.** En un sistema de primer orden (como RC) la ecuación característica es

$$s + \frac{1}{RC} = 0 \Rightarrow s = -\frac{1}{\tau}, \quad \tau \equiv RC.$$

Aquí no existe una “frecuencia natural” oscilatoria  $\omega_n$  (propia de sistemas de *segundo orden*), porque sólo hay un modo exponencial real. El parámetro  $\frac{1}{\tau}$  tiene unidades de  $s^{-1}$  y representa la *tasa de decaimiento exponencial* (también llamada razón de amortiguamiento), es decir, cuán rápido desaparece el transitorio y pasa a ser estacionario.

Físicamente, esto refleja que el capacitor se comporta como *abierto* en régimen estacionario (DC): tras el transitorio de carga/descarga,  $i(t) \rightarrow 0$  y  $v_C(t) \rightarrow V$ . Por lo tanto,  $\frac{1}{\tau}$  no es una frecuencia de oscilación sino la distancia del polo al origen sobre el eje real negativo (la rapidez con la que el sistema “olvida” su estado inicial).

**Circuito RLC** Del inciso anterior podemos extraer que:

$$\boxed{\omega_n^2 = \frac{1}{LC}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}}$$

**Ejemplo numérico** (valores usados antes): si  $R = 3$ ,  $L = 1$ ,  $C = \frac{1}{2}$ ,

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{1 \cdot \frac{1}{2}}} = \sqrt{2} \text{ rad/s} \approx 1.414 \text{ rad/s}$$

**F****RC (serie)**

Partimos de la respuesta al impulso

$$h(t) = \frac{1}{R} \left[ \delta(t) - \frac{1}{RC} e^{-t/(RC)} u(t) \right]$$

1) Transformada de Laplace de  $h(t)$

$$H(s) = \mathcal{L}\{h(t)\} = \frac{1}{R} \left[ 1 - \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} \right] = \frac{1}{R} \cdot \frac{s}{s + \frac{1}{RC}}$$

2) Relación  $Y(s) = H(s)X(s)$  y ecuación en  $s$

$$Y(s) = H(s)X(s) \implies \left(s + \frac{1}{RC}\right)Y(s) = \frac{1}{R} s X(s)$$

3) Volver al dominio del tiempo (ED) Usando  $\mathcal{L}^{-1}\{sY(s)\} = y'(t)$  y  $\mathcal{L}^{-1}\{sX(s)\} = x'(t)$ :

$$y'(t) + \frac{1}{RC} y(t) = \frac{1}{R} x'(t)$$

(Ecuación diferencial lineal de **primer orden** con coeficientes constantes.)

**Circuito RLC**

Partimos de la respuesta al impulso (raíces distintas  $s_1 \neq s_2$ )

$$h(t) = \frac{1}{L} \left( \frac{s_1}{s_1 - s_2} e^{s_1 t} - \frac{s_2}{s_1 - s_2} e^{s_2 t} \right) u(t) \quad \Re\{s_1\}, \Re\{s_2\} < 0$$

1) Transformada de Laplace de  $h(t)$

$$H(s) = \frac{1}{L} \left( \frac{s_1}{s_1 - s_2} \frac{1}{s - s_1} - \frac{s_2}{s_1 - s_2} \frac{1}{s - s_2} \right) = \frac{1}{L} \cdot \frac{s}{(s - s_1)(s - s_2)}$$

2) Relación  $Y(s) = H(s)X(s)$  y ecuación en  $s$

$$Y(s) = H(s)X(s) \implies [(s - s_1)(s - s_2)] Y(s) = \frac{1}{L} s X(s)$$

Expandiendo el denominador:

$$(s - s_1)(s - s_2) = s^2 - (s_1 + s_2)s + s_1 s_2$$

Por lo tanto:

$$(s^2 - (s_1 + s_2)s + s_1 s_2) Y(s) = \frac{1}{L} s X(s)$$

3) Volver al dominio del tiempo (ED)

$$y''(t) - (s_1 + s_2) y'(t) + s_1 s_2 y(t) = \frac{1}{L} x'(t)$$

Identificando con el circuito RLC (de la Actividad 1):

$$s_1 + s_2 = -\frac{R}{L}, \quad s_1 s_2 = \frac{1}{LC}$$

queda

$$y''(t) + \frac{R}{L} y'(t) + \frac{1}{LC} y(t) = \frac{1}{L} x'(t),$$

que es la ecuación diferencial lineal de **segundo orden** con coeficientes constantes.

*Observación (caso en que  $s_1 = s_2 = -a$ ):* Si  $H(s) = \frac{1}{L} \frac{s}{(s+a)^2}$ , entonces

$$h(t) = \frac{1}{L} (e^{-at} - a t e^{-at}) u(t),$$

y el mismo procedimiento lleva a

$$y''(t) + 2a y'(t) + a^2 y(t) = \frac{1}{L} x'(t),$$

que coincide con la forma estándar al identificar  $a = \frac{R}{2L}$  y  $a^2 = \frac{1}{LC}$ .