Problemas de Rég. Transitorio (I)

Itinerario de Eléctrica

Máster en Ingeniería Industrial

Antonio José González Fernández
Francisco Carreño Rodríguez
Grupo 2

Universidad de Almería
Curso: 2025/2026

Índice general

Índice de figuras

1. Problemas Teóricos

1.1. Problema 1

Considere un circuito RL con $R = 120\,\Omega$ y $L = 30\,\text{mH}$. En $t = 0$, se conecta una fuente de tensión de continua de $12\,\text{V}$ al circuito.

a) ¿Cuál es la constante de tiempo de este circuito?

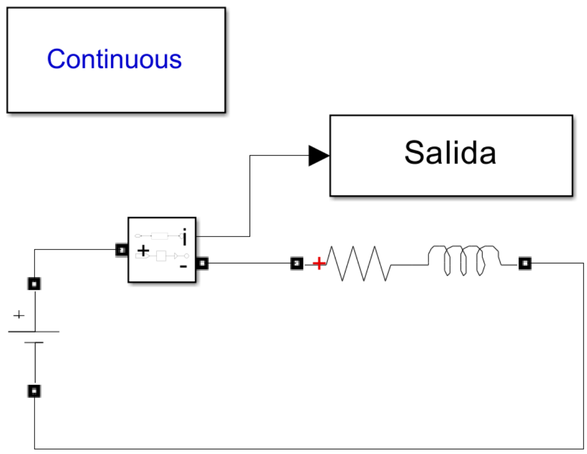

Figura 1.1: Esquema de Simulink. Ejercicio 1

$$v(t) = i(t) \cdot R + L \cdot \frac{d(i(t))}{dt}$$

$$V(s) = I(s) \cdot R + L \cdot s \cdot I(s) \rightarrow V(s) = I(s) \cdot (R + L \cdot s)$$

$$\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{1}{L \cdot s + R} \rightarrow \frac{I(s)}{V(s)} = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{L}{R} \cdot s + 1}$$

$$\tau = \frac{L}{R} = 0{,}00025\ seg$$

b) Dibuje la curva de respuesta de corriente, etiquetando los puntos clave.

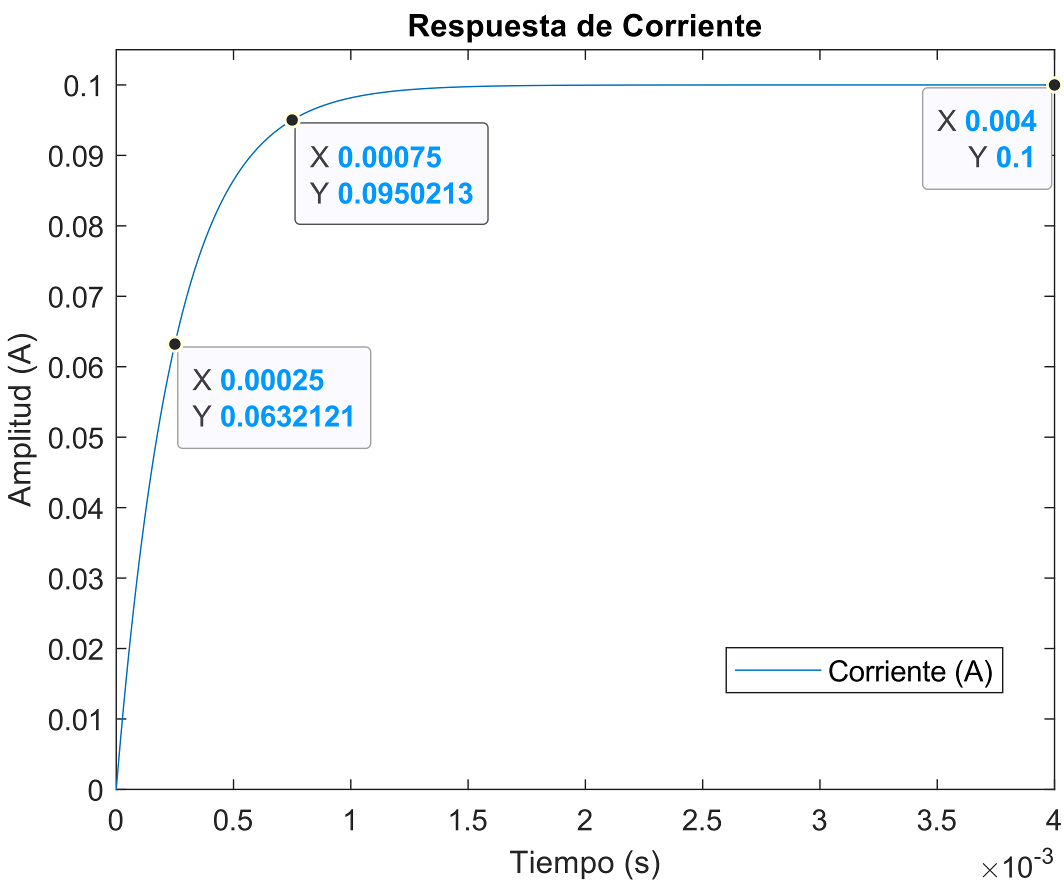

Figura 1.2: Respuesta en Corriente. Ejercicio 1

Como se puede apreciar en la figura 1.2, la respuesta es de un sistema de primer orden con una $\tau = 0{,}00025$ seg, que es el valor que tarda en alcanzar el 63 % del valor final. Una vez que el circuito alcanza el estado estacionario, la corriente adopta un valor de 100 mA. Además, se observa que su valor inicial es de 0 mA.

c) ¿Cuánto tiempo tarda la corriente en alcanzar el 95 % de su valor final?

Como se muestra en la figura 1.2, la corriente alcanza el 95 % de su valor final aproximadamente a los 750 µs.

1.2. Problema 2

Para un circuito RC en serie con $R = 330\ \Omega$ y $C = 220\ \mu$F, inicialmente cargado a 9 V:

a) ¿Cuál es la corriente inicial cuando el condensador se conecta a través de la resistencia en $t = 0$?

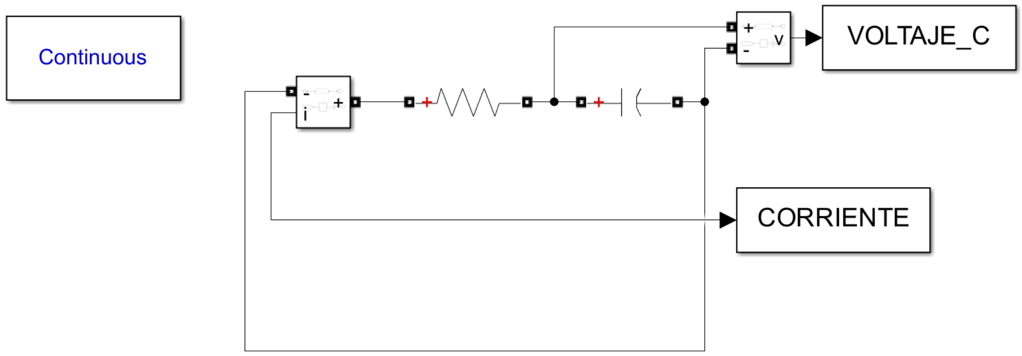

Figura 1.3: Esquema de Simulink. Ejercicio 2

$$i_c(t) = C \cdot \frac{dv(t)}{dt}$$

Aplicando Laplace:

$$I_c(s) = C \cdot s \cdot V(s) + C \cdot \overline{V_c}$$

Al estar en serie, la corriente que circula por el condensador y la resistencia es la misma, por lo que, aplicando la ley de Kirchhoff se llega a la siguiente ecuación:

$$I(s) \cdot R + V_c(s) = 0 \rightarrow I \cdot R + \frac{I}{C \cdot s} - \frac{\overline{V_c}}{s} = 0$$

$$I(s)(R + \frac{1}{C \cdot s}) - \frac{\overline{V_c}}{s} = 0$$

$$I(s) = -\frac{C\overline{V_c}}{R \cdot C \cdot s + 1}$$

$$I(s) = -\frac{\overline{V_c}}{R} \cdot \frac{1}{s - \frac{(-1)}{R \cdot C}}$$

Aplicando la Transformada Inversa de Laplace, llegamos a la ecuación de descarga del condensador:

$$i(t) = -\frac{\overline{V_c}}{R} \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}$$

Sustituyendo valores, se llega a que en el inicio ($t = 0$) el valor de la corriente es 27,27 mA. En la figura 1.4 se puede comprobar que el valor calculado es correcto.

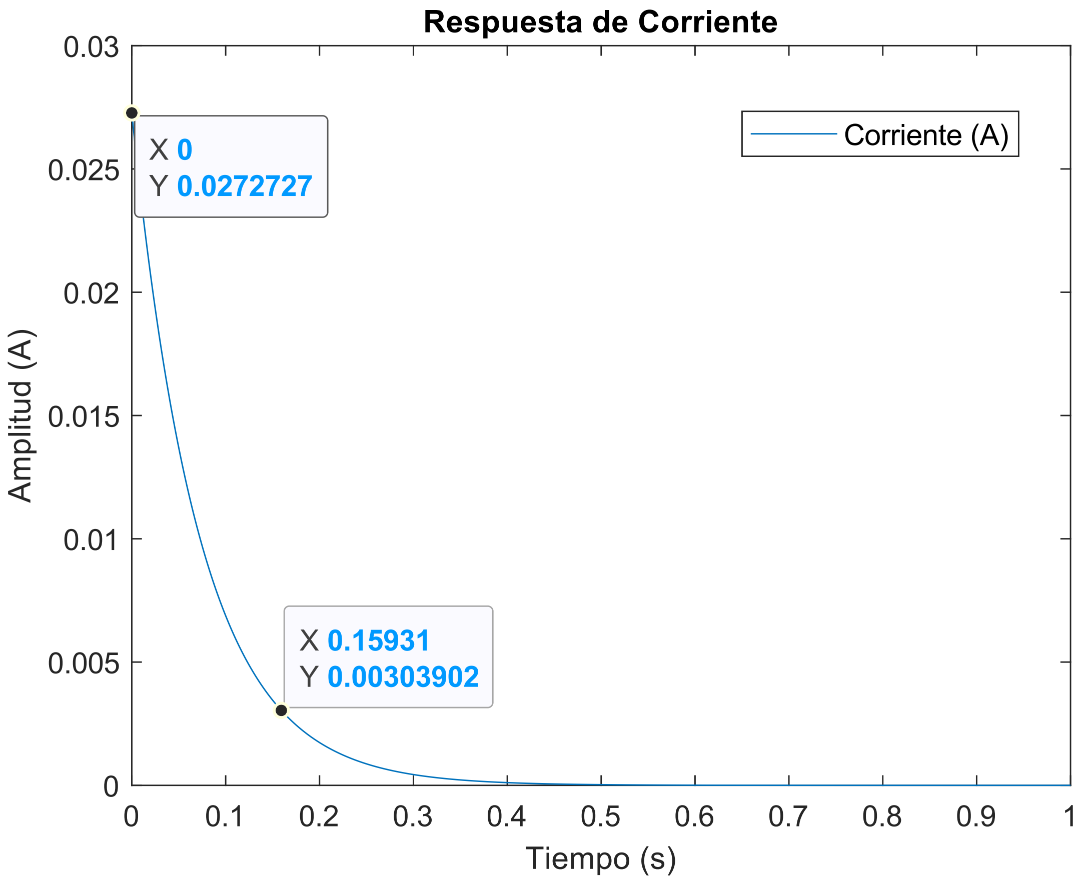

Figura 1.4: Respuesta en Corriente. Ejercicio 2

b) ¿Cuánto tiempo tardará el voltaje del condensador en caer a 1 V?

Aplicando Kirchhoff:

$$V_c(s) + V_R(s) = 0 \rightarrow V_c(s) = -I(s) \cdot R$$

$$V_c(s) = \frac{C \cdot R \cdot \overline{V_c}}{R \cdot C \cdot s + 1} = \overline{V_c} \cdot \frac{1}{s - \frac{(-1)}{R \cdot C}}$$

Aplicando la Transformada Inversa de Laplace, llegamos a la ecuación de descarga del condensador:

$$v_c(t) = \overline{V_c} \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}}$$

Sustituyendo Valores, se llega a la conclusión de que el condensador tarda 0,1595 seg en caer a 1 V. En la figura 1.5 se puede comprobar que el valor calculado es correcto.

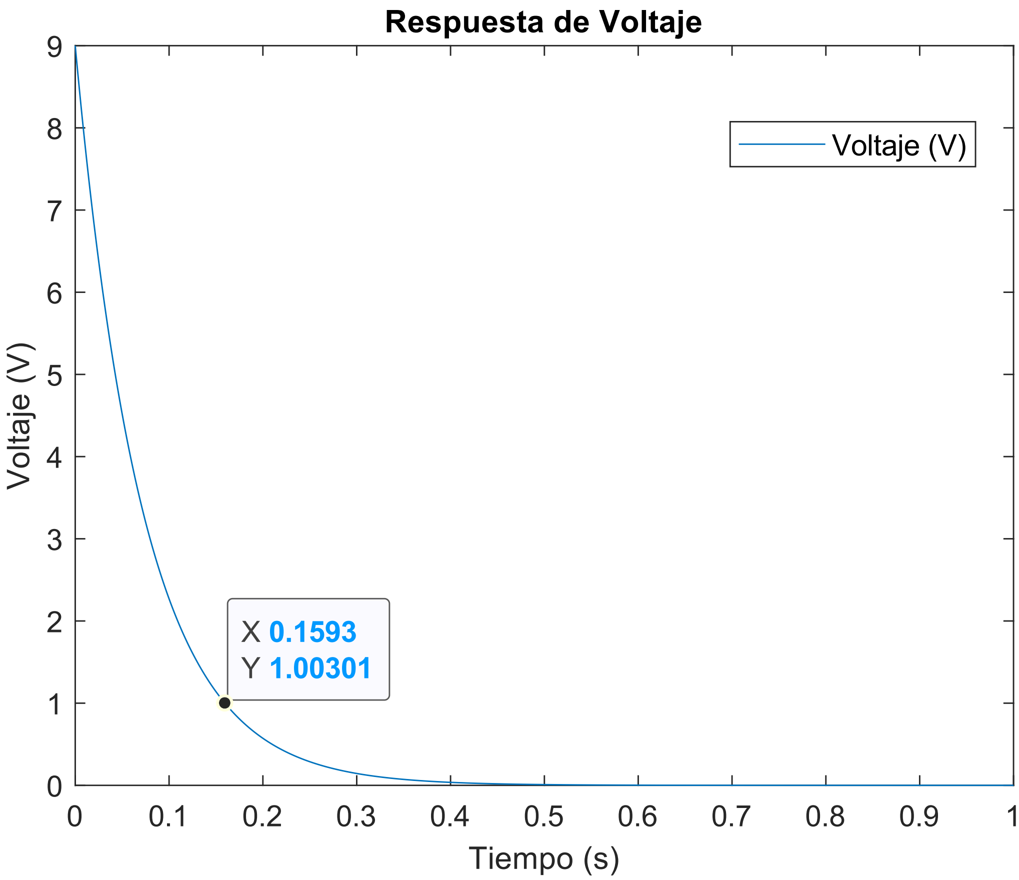

Figura 1.5: Respuesta en Voltaje. Ejercicio 2

1.3. Problema 3

Explique por qué la tensión de un condensador y la corriente de una bobina no pueden cambiar instantáneamente. Proporcione una interpretación física para cada caso, relacionándolo con la energía almacenada.

La tensión en un condensador y la corriente en una bobina no pueden cambiar de forma instantánea debido a las características energéticas asociadas a estos elementos.

Condensador

Un condensador almacena energía en forma de campo eléctrico entre sus placas, de acuerdo con la expresión:

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_C^2$$

donde C es la capacidad y V_C la tensión entre sus bornas. Para que la tensión cambie instantáneamente, sería necesario que la corriente a través del condensador fuese infinita, ya que:

$$i_C(t) = C \cdot \frac{dV_C(t)}{dt}$$

Una variación instantánea de V_C implicaría una derivada infinita, lo cual no es físicamente posible porque requeriría una corriente infinita y, por tanto, una potencia infinita. Por esta razón, la tensión en un condensador sólo puede variar de forma continua.

Bobina

Por otro lado, una bobina almacena energía en su campo magnético, según:

$$E_L = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i_L^2$$

donde L es la inductancia e i_L la corriente que circula por la bobina. La tensión en la bobina está dada por:

$$v_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$$

Si la corriente variara de manera instantánea, la derivada $\frac{di_L}{dt}$ sería infinita, lo que requeriría una tensión infinita. Esto tampoco es físicamente posible, por lo que la corriente a través de una bobina sólo puede cambiar de manera gradual.

Interpretación física y simulación

El comportamiento del condensador y la bobina se comprende a partir del principio de conservación de la energía, que impide que la energía almacenada en sus campos eléctricos y magnéticos varíe de manera instantánea. Por este motivo, las magnitudes asociadas (la tensión en el condensador y la corriente en la bobina) cambian de forma continua en el tiempo, nunca de manera instantánea.

El condensador se opone a los cambios rápidos de tensión, ya que para modificarla debe transferirse carga entre sus placas, lo que requiere un tiempo finito. Del mismo modo, la bobina se opone a los cambios bruscos de corriente, puesto que una variación repentina induciría una tensión elevada que actúa en sentido contrario al cambio, conforme a la ley de Lenz. En ambos casos, estos elementos tienden a mantener la continuidad de las variables que los caracterizan, limitando las variaciones instantáneas y suavizando la respuesta del circuito.

Para mostrar este comportamiento, se ha realizado una simulación en **Simulink** aplicando una señal escalón a un circuito RC y a un circuito RL, como se muestra en la Figura 1.6. Los resultados, mostrados en la Figura 1.7, evidencian que tanto la tensión del condensador como la corriente de la bobina evolucionan de forma progresiva, confirmando la oposición natural de estos elementos a los cambios instantáneos y su papel fundamental en los regímenes transitorios.

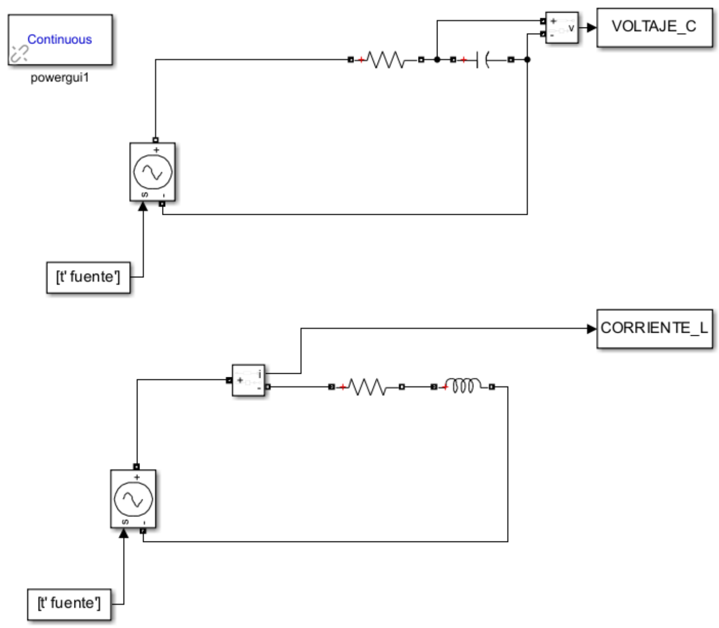

Figura 1.6: Esquema de Simulink. Ejercicio 3

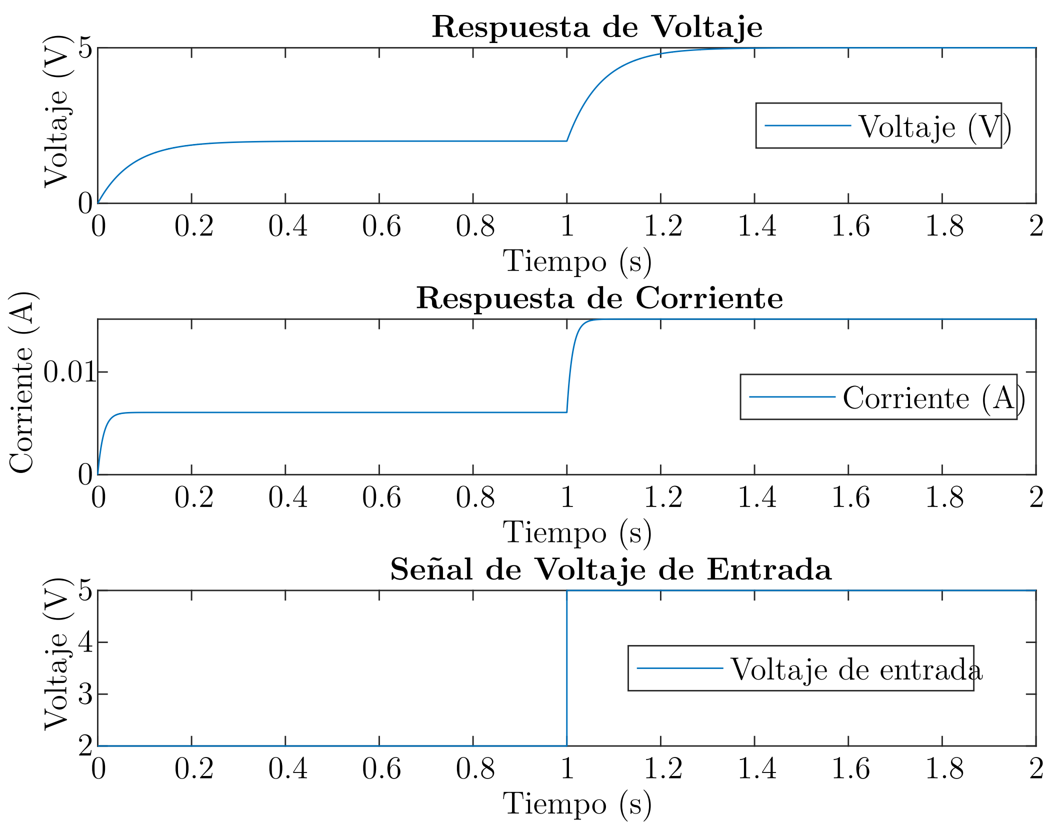

Figura 1.7: Respuesta de los Circuitos. Ejercicio 3

2. Problemas Prácticos

2.1. Problema 1

Utilice MATLAB/Simulink o Python para simular la respuesta escalón de un circuito RLC en serie. Grafique la tensión en el condensador y la corriente en la bobina. Parámetros:

$$R = 10\ \Omega, \quad L = 20\ \text{mH}, \quad C = 50\ \mu\text{F}, \quad \text{tensión de entrada} = 10\ \text{V (escalón)}.$$

Para resolver este problema, se diseña un modelo del circuito RLC en **Simulink**, compuesto por una resistencia, una bobina y un condensador conectados en serie, como se muestra en la Figura 2.1. La fuente de tensión aplicada es un escalón de 10 V en $t = 0,05$ seg, con el objetivo de observar el comportamiento transitorio de la corriente en la bobina (corriente del circuito) y la tensión en el condensador.

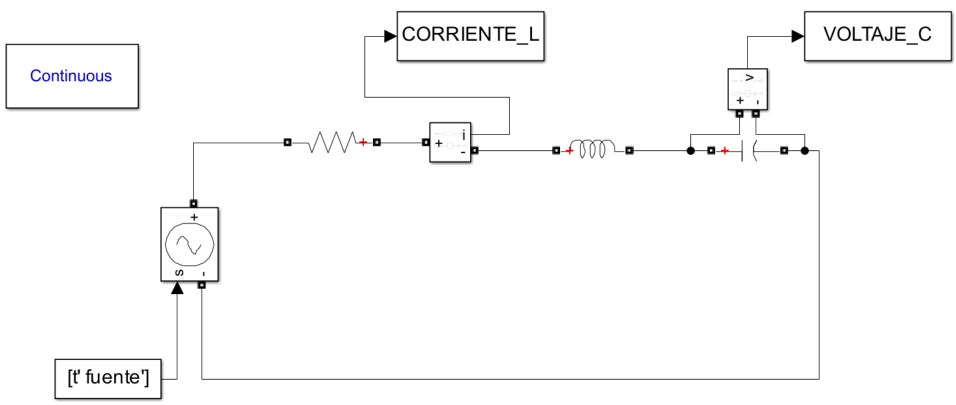

Figura 2.1: Esquema de Simulink. Ejercicio 4

A partir de los resultados de la simulación, es posible analizar la respuesta temporal del circuito y caracterizar su comportamiento dinámico. No obstante, este apartado se centrará en el estudio de la forma en que cada elemento del circuito (resistencia, bobina y condensador) responde ante la aplicación de la señal escalón.

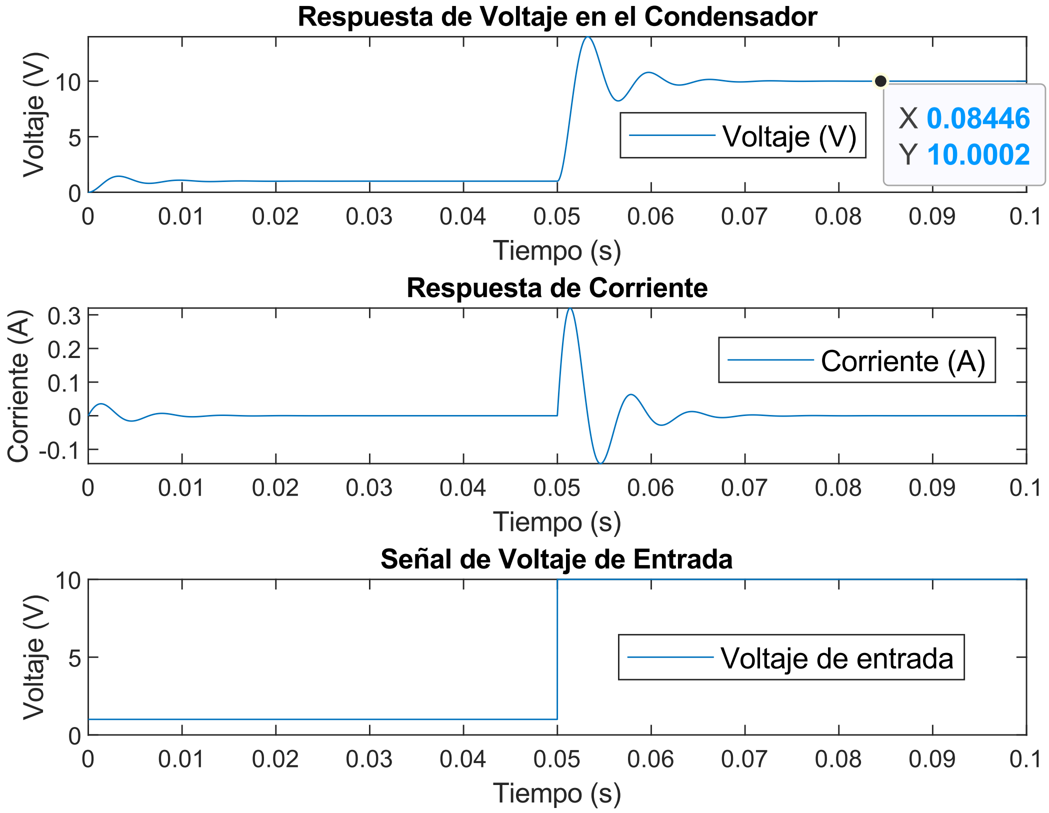

Figura 2.2: Respuesta del Circuito. Ejercicio 4

Al analizar los resultados mostrados en la Figura 2.2, se observa el comportamiento característico de un circuito RLC en serie sometido a una excitación tipo escalón. Inicialmente, el circuito parte del reposo, con el condensador descargado y sin corriente circulando. En el instante $t = 0{,}05$ s, se aplica una señal de tensión de 10 V, lo que provoca la aparición inmediata de corriente en el circuito. En ese momento, el condensador se comporta como un cortocircuito, ya que su tensión inicial es nula, permitiendo el paso de corriente mientras comienza a cargarse. La resistencia, de valor bajo, apenas limita este flujo, por lo que la corriente alcanza un valor elevado en los primeros instantes.

La bobina, por el contrario, actúa inicialmente como un circuito abierto, oponiéndose al cambio repentino de corriente debido a la energía que debe acumular en su campo magnético. En un intervalo breve, su reactancia disminuye hasta comportarse casi como un cortocircuito, facilitando la circulación de corriente. A medida que el condensador se carga, la tensión en sus bornes aumenta y la corriente disminuye progresivamente. Cuando el condensador alcanza su tensión máxima (aproximadamente igual a la de la fuente), se comporta como un circuito abierto, bloqueando el paso de corriente.

Este proceso genera un régimen transitorio rápido, con un sobreimpulso y pequeñas oscilaciones antes de estabilizarse, propias de un sistema de segundo orden subamortiguado. Finalmente, en el estado estacionario, la corriente del circuito tiende a cero y la caída total de tensión se mantiene en el condensador.

3. Problema Avanzado

3.1. Problema 1

Un circuito RLC en serie tiene $R = 400\ \Omega$, $L = 1$ H y $C = 10\ \mu$F. Se conecta a una fuente DC de 15 V en $t = 0$.

a) Determine si el circuito está sobreamortiguado, críticamente amortiguado o subamortiguado. Justifique su respuesta calculando los parámetros α y ω_0 que definen el comportamiento dinámico del sistema.

Aplicando la ley de Kirchhoff en el lazo del RLC serie con entrada $v(t)$:

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

Derivando:

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

Con condiciones iniciales nulas, se aplica la transformada de Laplace:

$$L \cdot s^2 \cdot I(s) + R \cdot s \cdot I(s) + \frac{1}{C} \cdot I(s) = s \cdot V(s)$$

Función de transferencia que relaciona la corriente del circuito con la entrada:

$$\frac{I(s)}{V(s)} = \frac{C \cdot s}{L \cdot C \cdot s^2 + R \cdot C \cdot s + 1} = \frac{\frac{1}{L} \cdot s}{s^2 + \frac{R}{L} \cdot s + \frac{1}{L \cdot C}}$$

El denominador común define el polinomio característico:

$$D(s) = s^2 + \frac{R}{L} \cdot s + \frac{1}{L \cdot C} = s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_0 \cdot s + \omega_0^2 = s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2$$

de donde se identifican los parámetros:

$$\alpha = \frac{R}{2 \cdot L}, \qquad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \qquad \zeta = \frac{\alpha}{\omega_0}$$

Sustituyendo los valores del enunciado se obtiene:

$$\alpha = \frac{400}{2 \cdot 1} = 200\,\mathrm{s}^{-1}, \qquad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{1 \cdot 10^{-5}}} \approx 316{,}23\,\mathrm{rad/s}, \qquad \zeta = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{200}{316{,}23} \approx 0{,}63.$$

Con estos resultados, como $\alpha < \omega_0$ se concluye que el circuito es **subamortiguado** (el régimen transitorio presenta oscilaciones amortiguadas). De forma equivalente, al comprobar que $\zeta < 1$ ($\zeta \approx 0{,}63$), se llega a la misma conclusión: **subamortiguado**.

b) Dibuje la forma de onda esperada para la corriente $i(t)$, explicando las características clave de su evolución temporal, como la presencia de posibles oscilaciones, el tiempo de estabilización aproximado y el comportamiento en régimen permanente.

A partir de la simulación realizada en **Simulink**, representada en la Figura 3.1, se ha obtenido la forma de la señal de la corriente que circula por el circuito RLC.

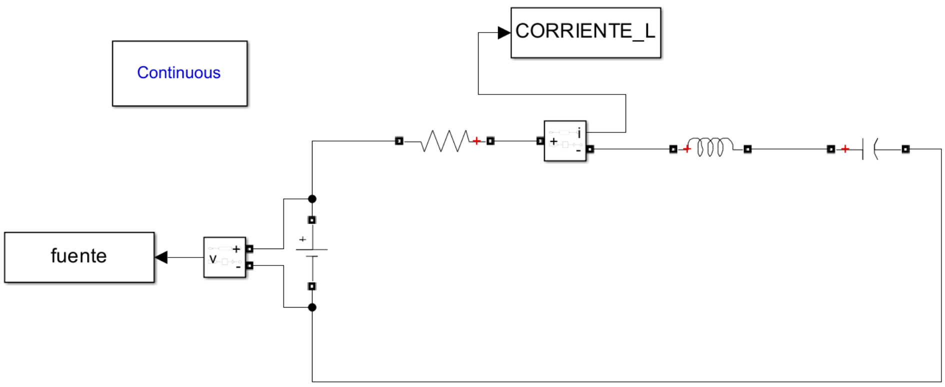

Figura 3.1: Esquema de Simulink. Ejercicio 5

Mediante el análisis de la gráfica mostrada en la Figura 3.2, se han identificado los tiempos y amplitudes más representativos, que permiten caracterizar el comportamiento transitorio del sistema. Los valores obtenidos son los siguientes:

$$t_{p1} = 0{,}00363 \text{ s}, \quad I_{p1} = 0{,}0230083 \text{ A}, \qquad t_{p2} = 0{,}02928 \text{ s}, \quad I_{p2} = 0{,}0001361 \text{ A},$$

$$t_{z1} = 0{,}01276 \text{ s}, \qquad t_{z2} = 0{,}02551 \text{ s}.$$

Donde t_{p1} e I_{p1} corresponden al tiempo y la amplitud del primer pico positivo de la corriente, mientras que t_{p2} e I_{p2} representan el segundo pico consecutivo de igual signo. Por su parte, t_{z1} y t_{z2} indican los instantes en los que la corriente cruza por cero en dos puntos consecutivos, permitiendo así estimar el período de oscilación amortiguada del sistema.

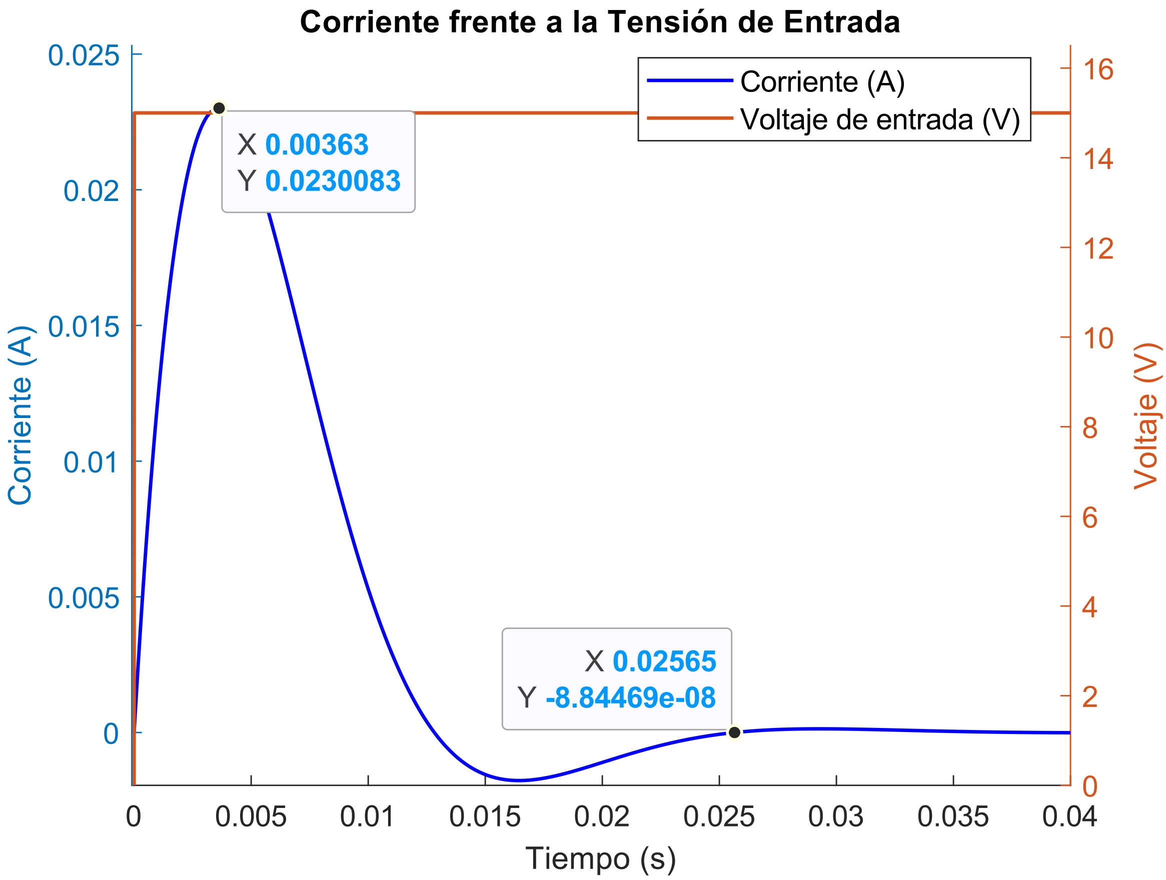

Figura 3.2: Respuesta del Circuito. Ejercicio 5

A partir de estos valores se calcula el período amortiguado:

$$T_d = t_{p2} - t_{p1} = 0{,}02928 - 0{,}00363 = 0{,}02565 \text{ s}$$

y el decremento logarítmico:

$$\delta = \ln\left(\frac{I_{p1}}{I_{p2}}\right) = \ln\left(\frac{0{,}0230083}{0{,}0001361}\right) = 5{,}08$$

Con ello se obtiene el factor de amortiguamiento:

$$\alpha = \frac{\delta}{T_d} = \frac{5{,}08}{0{,}02565} = 198{,}1 \text{ s}^{-1}$$

la frecuencia amortiguada:

$$\omega_d = \frac{2\pi}{T_d} = \frac{2\pi}{0{,}02565} = 244{,}9 \text{ rad/s}$$

y la frecuencia natural:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_d^2 + \alpha^2} = \sqrt{244{,}9^2 + 198{,}1^2} = 315{,}9 \text{ rad/s}$$

Finalmente, el coeficiente de amortiguamiento resulta:

$$\zeta = \frac{\alpha}{\omega_0} = \frac{198{,}1}{315{,}9} = 0{,}63.$$

Estos resultados son prácticamente idénticos a los obtenidos teóricamente en el apartado anterior ($\alpha = 200\ \mathrm{s}^{-1}$, $\omega_0 = 316{,}23$ rad/s, $\zeta = 0{,}63$), lo que confirma la validez del modelo y de la simulación.

En la respuesta temporal se observa una corriente con un pico inicial pronunciado seguido de oscilaciones amortiguadas que se atenúan hasta anularse, lo que caracteriza un comportamiento **subamortiguado**. El sistema presenta una respuesta transitoria rápida, con una frecuencia de oscilación de aproximadamente 245 rad/s y un tiempo de establecimiento del orden de 0,02 s, tras el cual la corriente tiende a cero, alcanzándose el régimen estacionario previsto para una excitación continua con un condensador en serie en el sistema.

4. Script de Simulación

En este capítulo se presenta el código utilizado para realizar las simulaciones de los cinco ejercicios desarrollados en *Simulink*. Cada bloque de código corresponde a un ejercicio independiente y se encarga de ejecutar la simulación, procesar los resultados y graficar las respuestas de voltaje y corriente.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                      Itinerario de Eléctrica                          %
%                 Problemas de Régimen Transitorio                      %
%                     Universidad de Almería                            %
%                    Curso Académico 2025-2026                          %
%                                                                       %
% Autor: Antonio José González Fernández                                %
% Autor: Francisco Carreño Rodríguez                                    %
% Grupo: 2                                                              %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%% Ejercicio 1
clc; clear all; close all;      % Limpia la consola, variables y cierra todas las figuras

ts = 0.00001;                   % Paso de muestreo (10 microseg)
t = [0:ts:0.004];               % Vector de tiempo de 0 a 4 ms

% Ejecuta la simulación del modelo Simulink 'EJERCICIO_1.slx' en el intervalo t
sim('EJERCICIO_1.slx', t);

% Gráfica de la salida (corriente)
figure
plot(t, Salida)                 % Dibuja la variable 'Salida' obtenida del modelo
title('Respuesta de Corriente')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
legend('Corriente (A)', 'Location', 'Best', 'FontSize', 10)
ylim([0 0.105])                 % Limita el eje Y para ver mejor la respuesta
```

```
%% Ejercicio 2
clc; clear all; close all;       % Limpieza de entorno

ts = 0.00001;                    % Paso de muestreo
t = [0:ts:1];                    % Vector de tiempo de 0 a 1 s

% Simulación del modelo 'EJERCICIO_2.slx'
sim('EJERCICIO_2.slx', t);

% Gráfica de la corriente
figure(1)
plot(t, CORRIENTE)
title('Respuesta de Corriente')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Amplitud (A)')
legend('Corriente (A)', 'Location', 'Best', 'FontSize', 10)

% Gráfica del voltaje del capacitor
figure(2)
plot(t, VOLTAJE_C)
title('Respuesta de Voltaje')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Voltaje (V)')
legend('Voltaje (V)', 'Location', 'Best', 'FontSize', 10)



%% Ejercicio 3
clc; clear all; close all;       % Limpieza del entorno

ts = 0.00001;                    % Paso de muestreo
t = 0:ts:2;                      % Vector de tiempo de 0 a 2
   segundos

% Crear señal de voltaje de entrada:
% 2V desde t=0 hasta t<1s, y 5V desde t>=1s
fuente = 2 * ones(size(t));      % Inicializa el vector con 2V
fuente(t >= 1) = 5;              % Cambia a 5V después de 1s

% Ejecutar simulación del modelo 'EJERCICIO_3.slx'
sim('EJERCICIO_3.slx', t);

% Crear una figura con tres subgráficas
figure('Name', 'Ejercicio 3 - Señales', 'NumberTitle', 'off');

% Subgráfica 1: Voltaje en el capacitor
```

```
subplot(3,1,1)
plot(t, VOLTAJE_C)
title('Respuesta de Voltaje')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Voltaje (V)')
legend('Voltaje (V)', 'Location', 'Best', 'FontSize', 10)

% Subgráfica 2: Corriente en el inductor
subplot(3,1,2)
plot(t, CORRIENTE_L)
title('Respuesta de Corriente')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente (A)', 'Location', 'Best', 'FontSize', 10)

% Subgráfica 3: Señal de entrada aplicada
subplot(3,1,3)
plot(t, fuente)
title('Señal de Voltaje de Entrada')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Voltaje (V)')
legend('Voltaje de entrada', 'Location', 'Best', 'FontSize', 10)



%% Ejercicio 4
clc; clear all; close all;      % Limpieza del entorno

ts = 0.00001;                   % Paso de muestreo
t = 0:ts:0.1;                    % Vector de tiempo de 0 a 0.1
    segundos

% Crear señal de voltaje de entrada:

fuente = ones(size(t));     % Inicializa el vector con 0V
fuente(t >= 0.05) = 10;           % Cambia a 10V después de 0.05
    s

% Ejecutar simulación del modelo 'EJERCICIO_4.slx'
sim('EJERCICIO_4.slx', t);

% Crear una figura con tres subgráficas
figure('Name', 'Ejercicio 4 - Señales', 'NumberTitle', 'off');

% Subgráfica 1: Voltaje en el capacitor
subplot(3,1,1)
plot(t, VOLTAJE_C)
title('Respuesta de Voltaje')
xlabel('Tiempo (s)')
```

```
ylabel('Voltaje (V)')
legend('Voltaje (V)', 'Location', 'Best', 'FontSize', 10)

% Subgráfica 2: Corriente en el inductor
subplot(3,1,2)
plot(t, CORRIENTE_L)
title('Respuesta de Corriente')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Corriente (A)')
legend('Corriente (A)', 'Location', 'Best', 'FontSize', 10)

% Subgráfica 3: Señal de entrada aplicada
subplot(3,1,3)
plot(t, fuente)
title('Señal de Voltaje de Entrada')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Voltaje (V)')
legend('Voltaje de entrada', 'Location', 'Best', 'FontSize', 10)



%% Ejercicio 5
clc; clear all; close all;      % Limpieza del entorno

ts = 0.00001;                   % Paso de muestreo
t = 0:ts:0.05;                  % Vector de tiempo de 0 a 0.05
    segundos

% Ejecutar simulación del modelo 'EJERCICIO_5.slx'
sim('EJERCICIO_5.slx', t);

% Crear una figura con las dos señales
figure('Name', 'Ejercicio 5 - Corriente y Voltaje de Entrada', '
    NumberTitle', 'off');
hold on
% Eje izquierdo: Corriente
yyaxis left
plot(t, CORRIENTE_L, 'b', 'LineWidth', 1.2)
ylabel('Corriente (A)')
ylim([min(CORRIENTE_L)*1.1, max(CORRIENTE_L)*1.1]) % Margen
    visual
% Eje derecho: Voltaje de la fuente
yyaxis right
plot(t, fuente, 'Color', [0.85 0.33 0.10], 'LineWidth', 1.2) %
    naranja MATLAB
ylabel('Voltaje (V)')
ylim([min(fuente)*0.9, max(fuente)*1.1])
xlim([-0.0001, 0.04])

```

```
% Ejes y leyendas
xlabel('Tiempo (s)')
title('Corriente frente a la Tensión de Entrada')
legend({'Corriente (A)', 'Voltaje de entrada (V)'}, 'Location', '
    Best', 'FontSize', 10)
```