

# DISEÑO DE UN COMPENSADOR DE ADELANTO PARA UN CIRCUITO RLC SUB-AMORTIGUADO A TRAVÉS DEL ANÁLISIS LGR PARA LA MODIFICACIÓN DE SUS TIEMPOS CARACTERÍSTICOS

## DESIGN OF A FEEDFORWARD COMPENSATOR FOR AN UNDERDAMPED RLC CIRCUIT THROUGH LGR ANALYSIS FOR THE MODIFICATION OF ITS CHARACTERISTIC TIMES

Hernández Sánchez César<sup>1</sup>, González Playas Fidel<sup>2</sup>, Lastre Domínguez Carlos Mauricio<sup>3</sup>, Cruz Gómez Milton<sup>4</sup>, Sosa Cruz Pablo Moisés<sup>5</sup>

<https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v7i2.302>

<sup>1</sup>Maestría en Ciencias, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Electrónica, cesar.hernandez@itoaxaca.edu.mx, 9511959974, CP 68000. <https://orcid.org/0009-0002-2890-8099>

<sup>2</sup>Maestría en Ciencias, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ciencias Básicas, fidel.playas@itoaxaca.edu.mx, 9511959974, CP 68000. <https://orcid.org/0009-0007-9817-6897>

<sup>3</sup>Doctor en Ingeniería, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Electrónica, Carlos.lastre@itoaxaca.edu.mx, 9511959974, CP 68000. <https://orcid.org/0000-0003-2737-7644>

<sup>4</sup>Sexto Semestre, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Electrónica 21160352@itoaxaca.edu.mx, 9717166873, CP 71220. <https://orcid.org/0009-0004-1919-7891>

<sup>5</sup>Sexto Semestre, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Electrónica 21160406@itoaxaca.edu.mx, 9511473390, CP 68264. <https://orcid.org/0009-0007-3907-7020>

**Resumen** -- En este documento se diseñó y elaboró un compensador de adelanto para un circuito RLC subamortiguado con el objetivo de mejorar su estabilidad y respuesta transitoria. El proceso incluyó la obtención de la función de transferencia del circuito mediante el método de nodos y la Ley de Kirchhoff, confirmando su condición subamortiguada. Python se utilizó para calcular automáticamente los valores de los componentes del circuito, así como los parámetros de la respuesta al escalón.

El diseño del compensador se realizó utilizando el método de Lugar Geométrico de las Raíces (LGR) para determinar los valores del compensador que mejorarían la respuesta del sistema. Posteriormente, el compensador se implementó primero en protoboard y luego en una PCB, verificando su comportamiento con simulaciones en Proteus y Matlab, y con mediciones prácticas.

Como resultado, se logró una mayor estabilidad, una respuesta transitoria más rápida y controlada, una reducción significativa de la sobreoscilación y una optimización general del desempeño del sistema.

**Palabras Clave:** Circuito RLC, Compensador, Sistema.

**Abstract** -- In this document, a lead compensator was designed and implemented for an underdamped RLC circuit aiming to enhance its stability and transient response. The process involved deriving the circuit's transfer function using nodal analysis and Kirchhoff's Law, confirming its underdamped condition. Python was employed to automatically compute component values and step response parameters.

The compensator design utilized the Root Locus Method (RLM) to determine compensator values that would

improve system response. Subsequently, the compensator was prototyped on a breadboard and then on a PCB, validating its behavior through simulations in Proteus and Matlab, as well as practical measurements.

As a result, increased stability, faster and controlled transient response, significant reduction in overshoot, and overall system performance optimization were achieved.

**Key words** -- RLC circuit, Compensator, System.

### INTRODUCCIÓN

En este informe, se aborda la aplicación de un compensador de adelanto en un circuito RLC sub amortiguado con el objetivo de mejorar la estabilidad y la respuesta transitoria del sistema. El contexto de estudio se centra en los desafíos asociados con la presencia de sub amortiguamiento en circuitos RLC, que pueden dar lugar a respuestas oscilatorias no deseadas. Para abordar esta problemática, se explora la implementación de un compensador de adelanto, destacando su capacidad para introducir fase positiva en la frecuencia de cruce. Este enfoque se traduce en beneficios tangibles, como el aumento del margen de ganancia y la minimización de la sobre oscilación, mejorando así la estabilidad global del sistema. Este informe proporciona una visión detallada de la teoría, el diseño y los resultados asociados con la aplicación de un compensador de adelanto en un contexto específico de circuito RLC sub amortiguado.

### DESARROLLO

#### Materiales:

- Regulador de voltaje LM7805
- 4 amplificadores operacionales LM741
- 3 Resistores de 10kΩ

- 2 Resistores de 100kΩ
- 2 Resistores de 1MΩ
- 1 Resistor de 120Ω
- 1 Resistor de 150kΩ
- 1 Resistores de 270Ω
- 1 Resistores de 5100Ω
- 2 Capacitores electrolíticos de 1uF
- 2 Capacitores cerámicos de 100nF
- 2 Capacitores cerámicos de 10nF
- 1 Capacitor cerámico de 1nF
- 1 Inductor de 10mH
- 1 NE555
- 1 osciloscopio

### CREACIÓN DEL CIRCUITO RLC SUB-AMOTIGUADO.

El circuito realizado consiste en 3 resistencias, una capacitancia y una inductancia, se eligió esta configuración con el propósito de obtener una función de transferencia de segundo orden. El circuito es el de la figura 1, y tal como se observa el voltaje de salida o también llamado  $V_o$  se toma en el capacitor.

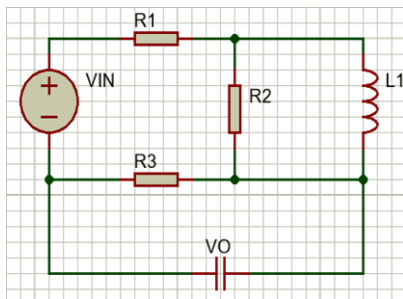


Figura 1. Circuito RLC propuesto.

### OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL CIRCUITO RLC.

Para obtener la función de transferencia se hizo el análisis de la diferencia de la salida respecto a la entrada, para ello se utilizó el método de nodos, de acuerdo a la ley de corrientes de Kirchhoff. Posteriormente se realizó este análisis en el circuito para hallar las ecuaciones, quedando como se muestra en la Figura 2.

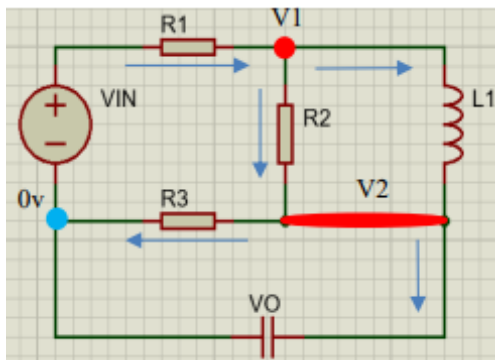


Figura 2. Análisis por nodos.

A continuación, se muestra el proceso algebraico para la obtención de las ecuaciones por el método de nodos, con el cual se obtuvo la función de transferencia del circuito.

$$\frac{v_{in} - v_1}{R_1} = (v_1 - v_2) \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{Ls} \right) \quad \text{Ec. (1)}$$

$$(v_1 - v_2) \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{Ls} \right) = v_2 \left( \frac{1}{R_3} + Cs \right) \quad \text{Ec. (2)}$$

$$v_2 = v_{out} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$(v_1 - v_{out}) = \frac{v_{out}(R_2 Ls)(1 + CsR_3)}{R_3(Ls + R_2)} \quad \text{Ec. (4)}$$

$$v_1 = v_{out} \left[ \frac{R_2 Ls + CLR_3 R_2 s^2}{R_3 Ls + R_3 R_2} + 1 \right] \quad \text{Ec. (5)}$$

$$\frac{v_{in}}{R_1} = \left( v_{out} \left[ \frac{R_2 Ls + CLR_3 R_2 s^2}{R_3 Ls + R_3 R_2} + 1 \right] - v_{out} \right) \frac{1}{R_2} +$$

$$\frac{1}{Ls} + \frac{v_{out}}{R_1} \left[ \frac{R_2 Ls + CLR_3 R_2 s^2}{R_3 Ls + R_3 R_2} + 1 \right] \quad \text{Ec. (6)}$$

$$v_{in} = R_1 v_{out} \left[ \frac{1 + CR_3 s}{R_3} \right] + v_{out} \left[ \frac{R_2 Ls + CLR_3 R_2 s^2}{R_3 Ls + R_3 R_2} + 1 \right] \quad \text{Ec. (7)}$$

$$v_{in} = v_{out} \left[ \frac{R_1 + CR_1 R_3 s}{R_3} + \frac{R_2 Ls + CLR_3 R_2 s^2}{R_3 Ls + R_3 R_2} + 1 \right] \quad \text{Ec. (8)}$$

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{1}{\left[ \frac{R_1 + CR_1 R_3 s}{R_3} + \frac{R_2 Ls + CLR_3 R_2 s^2}{R_3 Ls + R_3 R_2} + 1 \right]} \quad \text{Ec. (9)}$$

Simplificando esta ecuación se obtiene el siguiente resultado que corresponde a la función de transferencia.

$$\frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{R_3 Ls + R_3 R_2}{CLR_3(R_1 + R_2)s^2 + (R_1 L + R_1 R_2 R_3 C + R_2 L + R_3 L)s + R_2(R_1 + R_3)} \quad \text{Ec. (10)}$$

Para comprobar que el circuito sea sub-amortiguado el discriminante de la ecuación de segundo orden que se encuentra en el denominador debe ser negativo, pues este indica si las raíces son complejas, para facilitar la tarea de obtención de valores de resistencia, inductancia y capacitancia se utilizó Python para realizar los cálculos de manera automatizada.

```
import cmath
c=0.00000001
l=0.01
r1=120
r2=10000
r3=10000
a=(r1*r3*c*1)+(c*1*r2*r3)
b=(r1*1)-(r1*r2*r3*c)-(r2*1)+(r3*1)
c=(r1*r2)+(r3*r2)
A=a/a
B=b/a
C=c/a
wn=(C)**(1/2)
E=B/(2*wn)
wd=wn*((1-(E**2))**(1/2))
tp=cmath.pi/wd
oh=wn*E
mp=cmath.e**((-oh/wd)*cmath.pi)
dis=(b**2)-(4*a*c)
print("-----")
PROBLEMS OUTPUT DEBUG CONSOLE TERMINAL PORTS
PS D:\esp & "C:/Program Files/Python310/python.exe" d:/esp/control/main.py
discriminante: -3993406.56
```

Figura 3. Cálculo de la discriminante en Python.

Para valores de resistencia de 10kΩ, 120Ω, capacitancia de 10nF e inductancia de 10mH el discriminante es

negativo, esto indica un comportamiento sub-amortiguado.

Posteriormente con ayuda de Python se calcularon los distintos parámetros que describen la respuesta al escalón del sistema, de los cuales los de mayor interés son el tiempo pico, la máxima sobre-elongación y el tiempo de asentamiento, este último se calculó para un criterio de 2% de error tal como se muestra en la figura 4.

```

17 wn=(C)**(1/2)
18 E=B/(2*wn)
19 wd=wn*((1-(E**2))**(1/2))
20 tp=cmath.pi/wd
21 oh=wn*E
22 mp=cmath.e**((-oh/wd)*cmath.pi)

```

Figura 4. Parámetros.

### RESPUESTA AL ESCALON

En la simulación y en las pruebas físicas se esperaba un tiempo pico de aproximadamente 31µs, un tiempo de asentamiento de 252µs y una sobre elongación de 60%.

#### ➤ Simulación en Proteus 8.

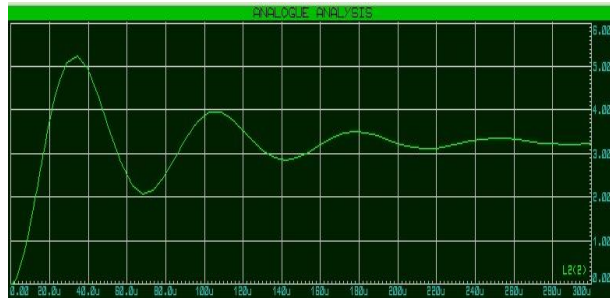


Figura 5. Simulación a respuesta escalón.

#### ➤ Simulación en Matlab

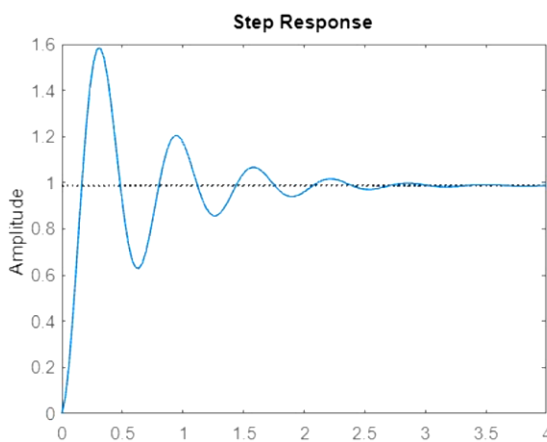


Figura 6. Simulación en Matlab a respuesta escalón.

Tras la realización exitosa de la simulación se procedió a las pruebas de laboratorio, en las cuales se obtuvieron los siguientes resultados en el osciloscopio para los diferentes parámetros de respuesta.

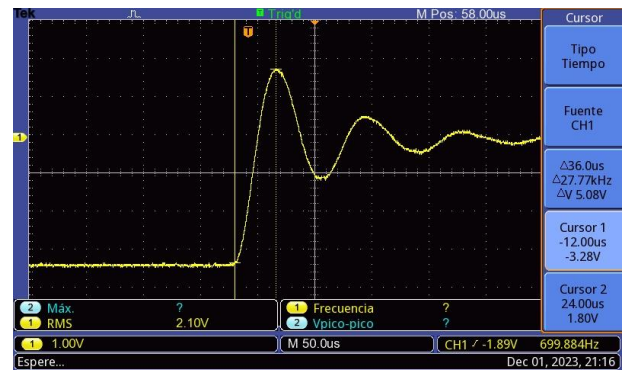


Figura 7. RLC Tiempo pico.

#### ➤ Tiempo de asentamiento del circuito RLC.

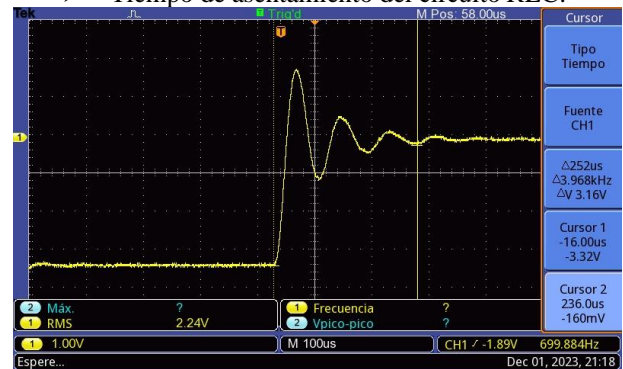


Figura 8. Tiempo de asentamiento.

#### ➤ Máximo sobre impulso del circuito RLC.

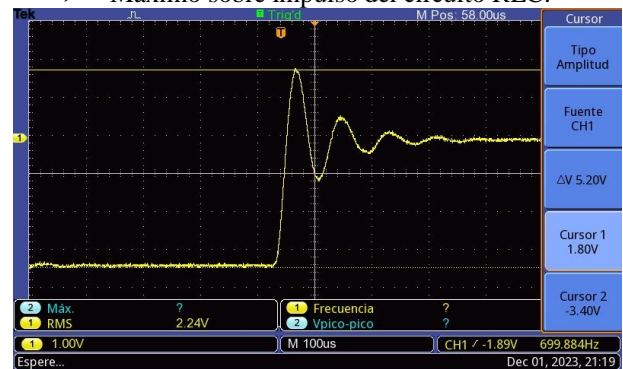


Figura 9. Máximo sobre impulso.

#### ➤ Valor de asentamiento del circuito RLC.

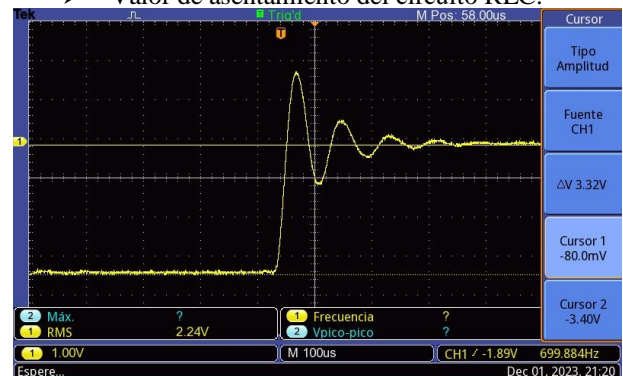


Figura 10. Valor de asentamiento.

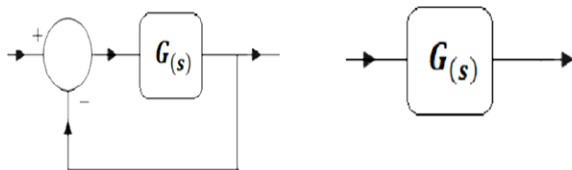
**Tabla 1.** Tabla comparativa de tiempos obtenidos sin compensador.

COMPARACION DE TIEMPOS OBTENIDOS			
Tiempo	Proteus 8	Matlab	físico
$t_p$	32 $\mu$ s	31.9 $\mu$ s	36 $\mu$ s
$m_p$	60%	58%	58%
$t_s$	250 $\mu$ s	252 $\mu$ s	252 $\mu$ s
$V_s$	3.33 v	3.43 v	3.32 v
$t_d$	10 $\mu$ s	10.16 $\mu$ s	10.24 $\mu$ s
$t_r$	15 $\mu$ s	15.95 $\mu$ s	16.17 $\mu$ s

**DISEÑO DE UN COMPENSADOR DE ADELANTO.**

Para el diseño del compensador es necesario hacer el análisis con la función de transferencia en lazo cerrado, y como la función obtenida del circuito RLC es de lazo abierto se hace el siguiente despeje de la fórmula correspondiente a la retroalimentación unitaria.

$$T(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} \therefore G(s) = \frac{T(s)}{1-T(s)} \quad \text{Ec. (11)}$$



**Figura 11.** Lazo cerrado y lazo abierto.

Se realiza la operación para obtener G(s).

$$T(s) = \frac{R_3 L s + R_3 R_2}{CLR_3(R_1 + R_2)S^2 + (R_1 L + R_1 R_2 R_3 C + R_2 L + R_3 L)S + (R_1 R_2 + R_3 R_2)} \quad \text{Ec. (12)}$$

$$G(s) = \frac{R_3 L s + R_3 R_2}{CLR_3(R_1 + R_2)S^2 + (R_1 L + R_1 R_2 R_3 C + R_2 L)S + R_1 R_2} \quad \text{Ec. (13)}$$

$$G(s) = \frac{9881.42S + 9881422924.9}{S^2 + 21857.7S + 11857707.09} \quad \text{Ec. (14)}$$

Para esta función de transferencia en lazo cerrado, los polos y ceros correspondientes son lo que se presentan a continuación.

Polos:

$$S = -10000$$

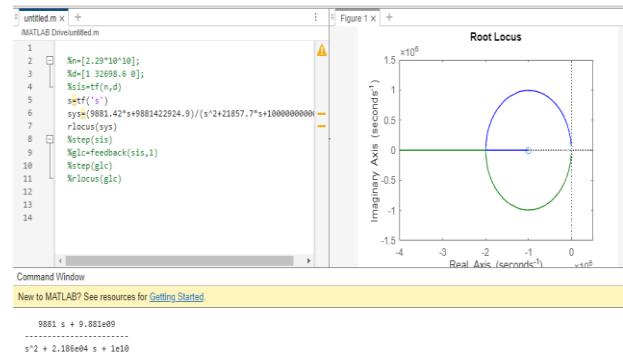
$$S = -11857$$

Cero:

$$S = 1000000$$

Con respecto a la función en lazo abierto los polos, ceros y frecuencia natural correspondientes son los siguientes:

$$T(s) = \frac{9881.42S + 9881422924.9}{S^2 + 31739.13S + 10000000000} \quad \text{Ec. (15)}$$



**Figura 12.** LGR en lazo abierto.

Polos:

$$S = -15869 \pm 98732j$$

Cero:

$$S = 1000000$$

Factor de amortiguamiento

$$\xi = 0.158$$

Frecuencia natural

$$\omega_n = 100000$$

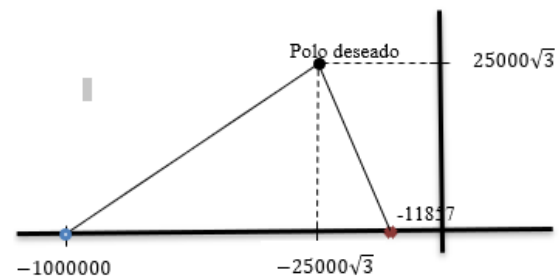
Para el compensador se proponen valores para  $\epsilon = 0.5$  y  $\omega_n = 50000$ , Pues se busca reducir el tiempo de asentamiento. Con estos se obtiene una nueva ecuación

$$S^2 + 50000S + 2500000000 \quad \text{Ec. (16)}$$

Igualando a cero y despejando S se obtienen los polos de esta nueva ecuación

$$s = -25000 \pm 25000\sqrt{3}j \quad \text{Ec. (17)}$$

Una vez teniendo estos valores se calcula la deficiencia del Angulo entre los polos y ceros del sistema en lazo cerrado y el polo deseado.



**Figura 13.** Deficiencia del Angulo.

$$P1 \phi = 180^\circ - \tan^{-1}(25000\sqrt{3}/13143) \quad \text{Ec. (18)}$$

$$P2 \phi = 180^\circ - \tan^{-1}(25000\sqrt{3}/15000) \quad \text{Ec. (19)}$$

$$C \phi = 180^\circ - \tan^{-1}(25000\sqrt{3}/975000) \quad \text{Ec. (20)}$$

Tabla 2. Polos y ceros.

POLO	ANGULO
$S = -10000$	$109.11^\circ$
$S = -11857.65$	$106.88^\circ$
CERO	ANGULO
$S = -1000000$	$2.54^\circ$

$$\text{Deficiencia} = 180^\circ + C\phi - P1\phi - P2\phi \quad \text{Ec. (21)}$$

$$\text{Deficiencia} = 180^\circ + 2.54^\circ - 109.11^\circ - 106.88^\circ \quad \text{Ec. (22)}$$

$$\text{Deficiencia} = -33.45^\circ \quad \text{Ec. (23)}$$

Teniendo la deficiencia angular se realiza un procedimiento para encontrar los polos y ceros del compensador, primero se traza una horizontal en el polo deseado, después una línea desde el origen al polo deseado, en seguida se traza una línea a la mitad, de la cual se trazarán 2 líneas más que cortaran el eje real y estos valores corresponden al compensador.

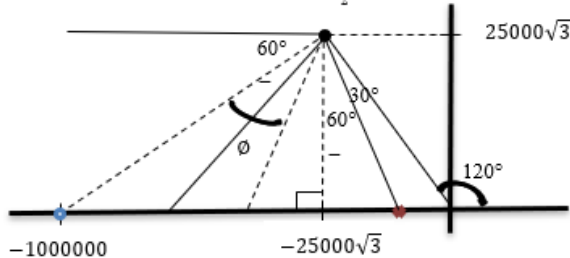


Figura 14. Determinación del polo y el cero de una red de adelanto.

Obtención del cero.

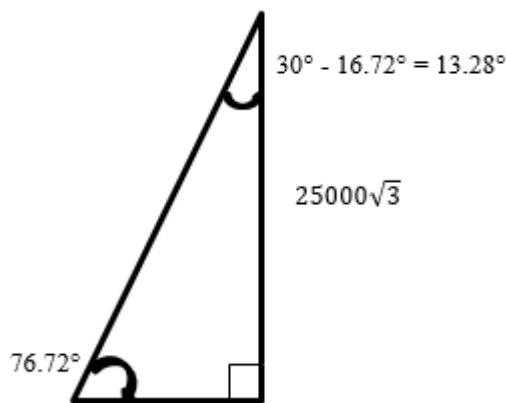


Figura 15. Método de obtención del cero.

$$\tan(76.72^\circ) = \frac{25000\sqrt{3}}{CA} \quad \text{Ec. (24)}$$

$$CA = \frac{25000\sqrt{3}}{\tan(76.72^\circ)} \quad \text{Ec. (25)}$$

$$CA = 10220.02 \quad \text{Ec. (26)}$$

$$C = -25000 - 10220.02 \quad \text{Ec. (27)}$$

$$C = -35220.02 \quad \text{Ec. (28)}$$

Obtención del polo.

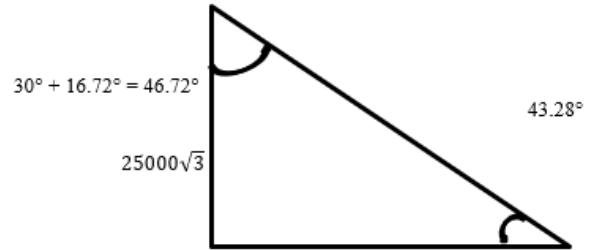


Figura 16. Método de obtención del polo.

$$\tan(43.28^\circ) = \frac{25000\sqrt{3}}{CA} \quad \text{Ec. (29)}$$

$$CA = \frac{25000\sqrt{3}}{\tan(43.28^\circ)} \quad \text{Ec. (30)}$$

$$CA = 45982.33 \quad \text{Ec. (31)}$$

$$P = -25000 - 45982.33 \quad \text{Ec. (32)}$$

$$P = -70982.33 \quad \text{Ec. (33)}$$

Con el polo y cero obtenido se escribe la ecuación del compensador.

$$G(S) = Kc \frac{S+35220.03}{S+70982.33} \quad \text{Ec. (34)}$$

$$T = (35220)^{-1} \quad \text{Ec. (35)}$$

$$T = 28.3929 \times 10^{-6} \quad \text{Ec. (36)}$$

$$\alpha T = (70982.33)^{-1} \quad \text{Ec. (37)}$$

$$\alpha = 0.4961 \quad \text{Ec. (38)}$$

$$Kc = 0.305 \quad \text{Ec. (39)}$$

$$G(S) = 0.305 \frac{S+35220.03}{S+70982.33} \quad \text{Ec. (40)}$$

Determinación de Kc a partir de la condición de magnitud.

$$\left| Kc \cdot \frac{S+35220.02}{S+70982.33} \cdot \frac{9881.42S+9881422924.9}{S^2+21857.7S+11857707.09} \right| \quad \text{Ec. (41)}$$

$$Kc = \left| \frac{(S+70982.33)(S^2+21857.7S+11857707.09)}{(S+35220.02)(9881.42S+9881422924.9)} \right| \quad \text{Ec. (42)}$$

La función de transferencia en lazo abierto del sistema diseñado es:

$$F(s) = \left[ 0.305 \frac{S+35220.03}{S+70982.33} \right] \left[ \frac{9881.42S+9881422924.9}{S^2+21857.7S+11857707.09} \right] \quad \text{Ec. (43)}$$

Función de transferencia en lazo cerrado que resulta es:

$$\frac{3013.833s^2+3119981254.15316s+1.06147 \times 10^{14}}{s^3+95853.8631s^2+4790068803.68416s+1.14564 \times 10^{14}} \quad \text{Ec. (44)}$$

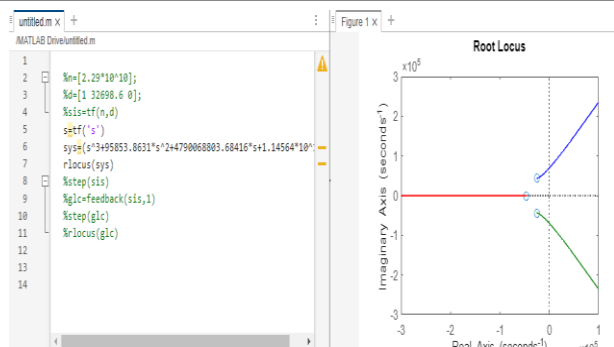


Figura 17. LGR con compensador y retroalimentación.

Se determinan los valores de los componentes a utilizar para el compensador.

$$0.305 = \frac{R4C1}{R3C2} \quad \text{Ec. (45)}$$

$$0.4961 = \frac{R2C2}{R1C1} \quad \text{Ec. (46)}$$

$$28.3929 \times 10^{-6} = R1C1 \quad \text{Ec. (47)}$$

$$1.43 \times 10^{-3} = R2C2 \quad \text{Ec. (48)}$$

$$R1 = 283.92 \quad \text{Ec. (49)}$$

$$R2 = 1435.3 \quad \text{Ec. (50)}$$

$$R3 = 5100 \quad \text{Ec. (51)}$$

$$R4 = 155.5 \quad \text{Ec. (52)}$$

$$C1 = 100 \text{ nF} \quad \text{Ec. (53)}$$

$$C2 = 10 \text{ nF} \quad \text{Ec. (54)}$$

Tras haber obtenido F(s), se realiza el procedimiento para visualizar los tiempos pico y máximo sobre impulso del circuito RLC con el compensador y retroalimentación, la comprobación de estos tiempos se realiza con el osciloscopio.

```
>> test
ans =
-2.4989e+04 + 4.3276e+04i
-2.4989e+04 - 4.3276e+04i
-4.5875e+04 + 0i

ans =
-1.0000e+06
-3.5220e+04
```

Figura 18. Polos y ceros.

Para el cálculo de los tiempos se utilizó Matlab para obtener los polos de la función de transferencia del sistema ya compensado, donde la parte imaginaria de los polos dominantes corresponden a  $w_d$ , con estos se calculan los demás parámetros.

$$w_d = 4.3276 \times 10^4 \quad \text{Ec. (55)}$$

$$\frac{3013.833s^2 + 3119981254.15316s + 1.06147 \times 10^{14}}{(s^2 + 50000s + 249000000)(s + 4.5875 \times 10^4)} \quad \text{Ec. (56)}$$

- $wn = 50000$  Ec. (57)
- $\zeta = 0.5$  Ec. (58)
- $tp = 72\mu s$  Ec. (59)
- $\delta = 25000$  Ec. (60)
- $mp = 0.16$  Ec. (61)
- $t_s = 160\mu s$  Ec. (62)

➤ Tiempo pico con compensador y retroalimentación.

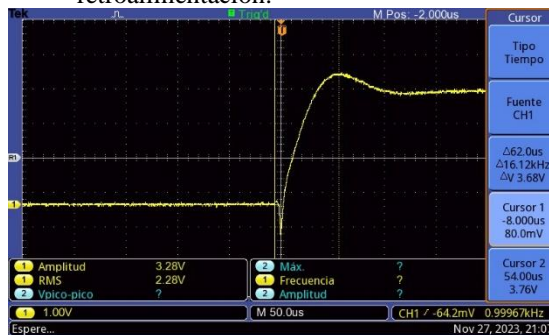


Figura 19. Tiempo pico con compensador y retroalimentación.

➤ Máximo sobre impulso con compensador y retroalimentación.

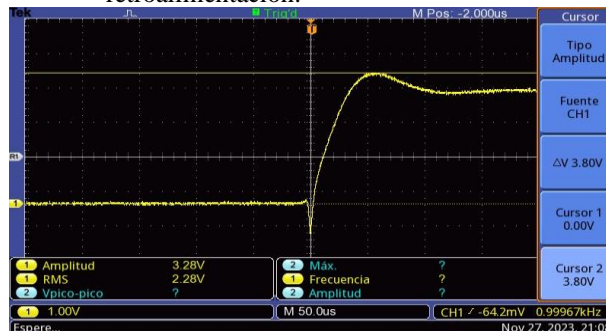


Figura 20. Máximo sobre impulso con compensador y retroalimentación.

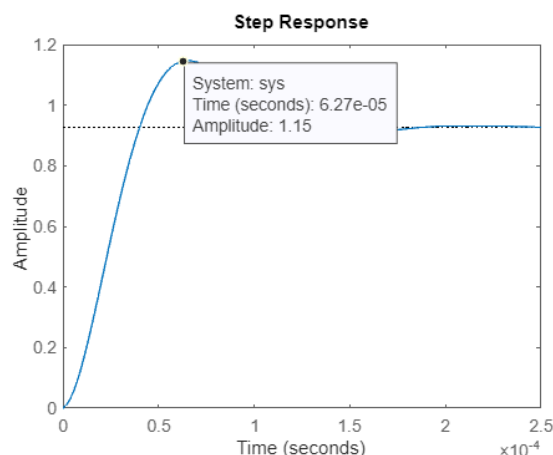


Figura 21. Señal sub-amortiguada con compensador y retroalimentada en Matlab.

**Tabla 3.** Tabla comparativa de los tiempos obtenidos con compensador.

COMPARACION DE TIEMPOS OBTENIDOS			
Tiempo	Proteus 8	Matlab	físico
$t_p$	64 $\mu s$	62.7 $\mu s$	62 $\mu s$
$m_p$	16%	15%	16%
$t_s$	168 $\mu s$	168 $\mu s$	168 $\mu s$
$V_s$	3.33 v	3.36 v	3.32 v
$t_d$	25.8 $\mu s$	23.1 $\mu s$	23.6 $\mu s$
$t_r$	44 $\mu s$	38.7 $\mu s$	39.3 $\mu s$

### DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para contextualizar los resultados obtenidos en este estudio, es relevante comparar nuestros hallazgos con investigaciones previas en el campo de la ingeniería de control y sistemas eléctricos.

El trabajo de Quintero et al. (2020) utilizó el mismo método de desarrollo de un compensador que el mostrado en este estudio, de manera que los resultados en ambos estudios fueron mejorar el comportamiento de señales subamortiguadas, en términos de estabilidad y respuesta transitoria del sistema. Aunque naturalmente, los datos, valores y elementos de los circuitos RLC no tuvieron similitudes, es notable que las técnicas empleadas al ser las mismas, los resultados esperados generales también lo fueron.

De manera similar, los resultados se pueden obtener pero con un distinto enfoque, que busque mejorar el control y estabilidad del sistema, destacando la relevancia de distintos métodos en la optimización de sistemas de control como lo es el análisis por el criterio de estabilidad de bode[1].

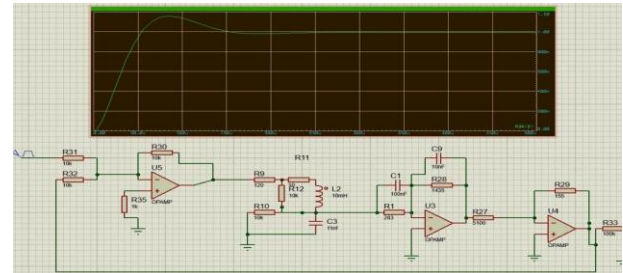
Un estudio adicional implementó un control Proporcional Integral Derivativo (PID), sintonizando sus parámetros mediante el método de Ziegler-Nichols[2]. Este método es diferente al utilizado en nuestro estudio y los otros mencionados anteriormente, ya que Ziegler-Nichols se basa en un enfoque empírico para ajustar los parámetros del controlador PID con el objetivo de mejorar la respuesta del sistema.

Aunque el método de Ziegler-Nichols y el diseño de compensadores de adelanto tienen diferentes fundamentos teóricos y procedimientos de implementación, ambos buscan mejorar la estabilidad y la respuesta transitoria del sistema controlado.

En comparación, los resultados de nuestro estudio muestran que el uso del compensador de adelanto diseñado por LGR puede proporcionar una mejora precisa y controlada en la respuesta transitoria y la estabilidad del sistema, similar a los resultados obtenidos con un controlador PID sintonizado por Ziegler-Nichols. Sin embargo, el proceso de diseño y ajuste de parámetros

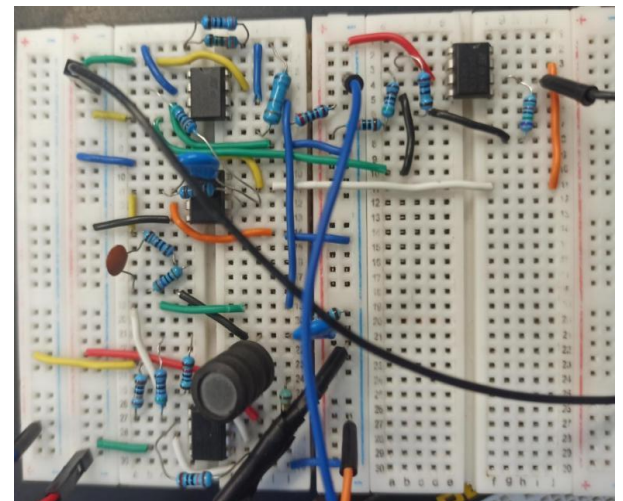
en nuestro enfoque puede ser más directo y basado en el análisis matemático de los polos del sistema, en contraste con el enfoque más empírico del método de Ziegler-Nichols.

Tras el diseño del compensador se procedió a simular el mismo con ayuda del software Proteus, en donde se utilizaron los Op-Amp para aplicar el compensador, tal y como se muestra en la figura 22.



**Figura 22.** Circuito con compensador simulado.

El siguiente paso, naturalmente, es la implementación de dicho circuito una vez comprobados los tiempos, y valores del compensador, pues estos deben ser igual a los calculados, para la implementación del circuito se utilizaron Op-Amps del modelo UA741CN los cuales, a pesar de tener 8 terminales, solo incluyen un Op-Amp cada uno, por lo que se utilizaron 4 en total (Figura 23.).



**Figura 23.** Circuito RLC con compensador implementado.

Tras realizarse diversas pruebas en donde los resultados muchas veces no resultaban convincentes, finalmente se lograron resolver los problemas, como malas conexiones en la “protoboard” o incluso material deficiente o poco fiable debido a su gran margen de error como lo eran algunas fuentes de voltaje y sondas de osciloscopio. Sin embargo, al obtenerse los tiempos y valores iguales o muy cercanos a los arrojados en la simulación se continuó al siguiente paso, la implementación del circuito en PCB.

El diseño del circuito fue realizado en EasyDEA, un software donde se facilita la creación del diseño de una

PCB (Fig 24) y también dónde es posible solicitar la creación de la misma con la facilidad del envío a domicilio.



Figura 24. Diseño de la PCB.

Finalmente, la PCB se soldó junto con los respectivos componentes y se realizaron últimas pruebas para monitorear que todos los resultados continuarán siendo los mismos.



Figura 25. PCB finalizada.

## CONCLUSIONES

Resumiendo, en este informe, se analizó un circuito RLC para obtener su función de transferencia y se evaluaron los tiempos y valores asociados a una respuesta subamortiguada. Posteriormente, se implementó un compensador diseñado específicamente para modular dicha señal, buscando mejorar la respuesta transitoria y la estabilidad del sistema.

El compensador se diseñó con el objetivo de ajustar la dinámica del circuito RLC subamortiguado, optimizando la respuesta en términos de tiempo de establecimiento, sobrepico y oscilaciones indeseadas. Este enfoque se basa en la utilización de componentes adicionales o técnicas de control para influir selectivamente en la respuesta del sistema.

En términos de aplicaciones prácticas, este tipo de compensadores resulta importante en contextos industriales y tecnológicos. Por ejemplo, en sistemas de control de procesos, la implementación de compensadores puede mejorar significativamente la estabilidad de los procesos industriales, reduciendo tiempos de respuesta no deseados y minimizando oscilaciones indeseadas.

Asimismo, en el ámbito de la electrónica de potencia, la aplicación de compensadores en circuitos RLC subamortiguados contribuye a optimizar la respuesta

transitoria de fuentes de alimentación conmutadas, mejorando la eficiencia y la calidad de la energía suministrada.

Así pues, este proyecto no solo aborda la teoría y análisis de un circuito RLC subamortiguado, sino que también demuestra la utilidad práctica de los compensadores al modificar y mejorar la respuesta dinámica de dicho sistema, con potenciales aplicaciones en diversas áreas de la ingeniería y la tecnología.

En futuros estudios, se explorará la aplicación de otros tipos de compensadores, dentro del mismo análisis por LGR, como el compensador de atraso y también el compensador de adelanto-atraso, para mejorar aún más el rendimiento de circuitos RLC subamortiguados.

Otro paso, sería considerar la utilización de técnicas de análisis en frecuencia para el diseño y optimización de compensadores. Este enfoque nos permitirá una evaluación de la respuesta en diferentes bandas de frecuencia, optimizando así el comportamiento del sistema en términos de estabilidad, respuesta transitoria y supresión de ruido.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al instituto tecnológico de Oaxaca y al departamento de ingeniería electrónica, por el préstamo del laboratorio y del equipo para realizar este Proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Orlando, S. V., & Rosario, L. O. M. (2019). Diseño de un compensador en adelanto por medio del criterio de estabilidad de bode para controlar el desplazamiento de un motor de CD, Congreso internacional de ingeniería electrónica memoria electro, (41), 224-229. [https://itchihuahua.mx/revista\\_electro/2019/CON-2\\_C.pdf](https://itchihuahua.mx/revista_electro/2019/CON-2_C.pdf)
- [2] Thomas, N., & Poongodi, P. (2009, julio 1-3). Position Control of DC Motor Using Genetic Algorithm Based PID Controller. World Congress on Engineering 2009, 1, 1618-1622. [http://iaeng.org/publication/WCE2009/WCE2009\\_p1618-1622.pdf](http://iaeng.org/publication/WCE2009/WCE2009_p1618-1622.pdf)
- [3] El Amplificador Operacional – Electrónica Práctica Aplicada. (2023, 2 de diciembre). diarioelectronicohoy desde 2002 periódico técnico electrónica profesional. <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/el-amplificador-operacional>
- [4] La respuesta de un circuito RC a un voltaje de escalón (artículo) | Khan Academy. (2023, 2 de diciembre). Khan Academy. <https://es.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/ee-natural-and-forced-response/a/ee-rc-step->

[response#:~:text=Si%20el%20cambio%20es%20un.es%20una%20respuesta%20al%20escalón](#)

[5] Alexander, C. K. (2008). Fundamentals of electric circuits (4a ed.). McGraw-Hill.

[6] Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2003). Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. Pearson educación.

[7] Floyd, T. L., Salas, R. N., González, L. M. O., & López, G. P. (2007). Principios de circuitos eléctricos. Pearson Educación.

[8] Sadiku, M. (1999). Elementos de Electromagnetismo. Compañía Ed. Cont.

[9] Floyd, T. L. (2002). Dispositivos Electronicos. Ed. Limusa S.A. C.V.

[10] Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB (1.a ed.). (2010). Pearson Educación, S.A. <http://lcr.uns.edu.ar/fcr/images/Introduccion%20a%20Los%20Sistemas%20de%20Control.pdf>

[11] Bernardoni, R., & R D. Novodvoretz, O. (s. f.). Guía de estudio 8: Circuitos RLC serie. [https://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2020/07/ELECTRONICA\\_Gu--a08-Circuitos-RLC.pdf](https://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2020/07/ELECTRONICA_Gu--a08-Circuitos-RLC.pdf)

[12] Santos, C. o. V., & Echavarría, J. L. R. (2012). Fundamentos de circuitos eléctricos. Instituto Tecnológico Metropolitano.

[13] Ornelas, F. (s. f.). Control analógico II Diseño y compensación de sistemas en el dominio de la frecuencia. Umich. [https://dep.fie.umich.mx/~formelas/data/uploads/pres\\_03\\_dc.pdf](https://dep.fie.umich.mx/~formelas/data/uploads/pres_03_dc.pdf)

[14] Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. (5.a ed.). Pearson Educación, S. A. <https://ingenierovizcaino.com/material/libros/sd/ingenieria-de-control-moderna-ogata-5ed.pdf>

[15] Quintero-Rojas, J., C. B., & Coronel, M. (2020). Diseño y construcción de un módulo de control analógico tipo adelanto-atraso como herramienta de aprendizaje en la teoría de control. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, 43(3), 150-158. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=605766264006>

#### ROLES DE CONTRIBUCIÓN

Rol	Autor(es)
Conceptualización	Milton Cruz Gómez (colaborador) Pablo Moisés Sosa Cruz (colaborador)
Curación de datos	Milton Cruz Gómez Pablo Moisés Sosa Cruz
Administración de proyecto	Fidel González Playas (Colaborador)
Recursos	Milton Cruz Gómez (colaborador) Pablo Moisés Sosa Cruz (colaborador)

Software	Milton Cruz Gómez (colaborador) Pablo Moisés Sosa Cruz (colaborador)
Supervisión	Cesar Hernández Sánchez (principal)
Validación	Carlos Mauricio Lastre Domínguez (colaborador)
Visualización	Carlos Mauricio Lastre Domínguez (colaborador)
Redacción (borrador original)	Milton Cruz Gómez (colaborador) Pablo Moisés Sosa Cruz (colaborador) Cesar Hernández Sánchez (principal)
Redacción (revisión y edición)	Fidel González Playas (colaborador)



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.