

COMPENSACIÓN EN ADELANTO DE UN FILTRO PASABAJAS A LA RESPUESTA ESCALÓN A TRAVÉS DEL ANÁLISIS EN FRECUENCIA Y SU INFLUENCIA EN LOS TIEMPOS CARACTERÍSTICOS

FORWARD COMPENSATION OF A LOW-PASS FILTER TO THE STEP RESPONSE THROUGH FREQUENCY ANALYSIS AND ITS INFLUENCE ON THE CHARACTERISTIC TIMES

Hernández Sánchez César¹, Caballero Julián Franco Gabriel², Domínguez Ramírez Arturo³, Anguera Hernández Aries Andreina⁴, González Arellanes Jared Elí⁵

¹Maestría en ciencias. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Electrónica, cesar.hernandez@itoaxaca.edu.mx, 9511959974, 71233

²Maestría en ciencias. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Electrónica, franco.caballero@itoaxaca.edu.mx, 9511346062, 68285

³Maestría en ciencias. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Electrónica, arturo.dominguez@itoaxaca.edu.mx, 9513282900, 68023

⁴Estudiante de Ingeniería Electrónica. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Electrónica, 20160403@itoaxaca.edu.mx, 9721148168, 68285

⁵Estudiante de Ingeniería Electrónica. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Oaxaca, Departamento de Ingeniería Electrónica, 20160427@itoaxaca.edu.mx, 9511560220, 71286

Resumen –En este trabajo se da a conocer el análisis matemático de un compensador en adelanto aplicado a un filtro pasa-bajas de segundo orden en configuración Sallen-Key a la respuesta escalón, esto a través del análisis en frecuencia, así como su influencia en los tiempos característicos. Cada uno de los cálculos realizados han sido corroborado por Matlab y el software de simulación y de análisis de circuitos eléctricos TINA.

La finalidad de la investigación es observar como la compensación en frecuencia también aplica para suavizar la respuesta al escalón de un circuito, en este caso, un filtro pasa-bajas.

Palabras Clave: Análisis en frecuencia, Compensador, Configuración Sallen-Key, Filtro pasa-bajas, Respuesta escalón.

Abstract -- In this paper, the mathematical analysis of a leading compensator applied to a second-order low-pass filter with Sallen-Key configuration to the step response is presented, this through frequency analysis, as well as its influence on the characteristic times. Each of the calculations carried out has been corroborated by Matlab and the TINA electrical circuit simulation and analysis software. The purpose of this resource is to observe the frequency compensation also applies to smooth the step response of a circuit, in this case, a low-pass filter.

Key words – Frequency Analysis, Compensator, Sallen-Key Configuration, Low Pass Filter, Step Response.

INTRODUCCIÓN

Los filtros pueden clasificarse en filtros activos o filtros pasivos según empleen o no fuentes controladas (elementos activos, tales como amplificadores y sus derivados). Los filtros eléctricos pasivos se implementan

en general con inductores y capacitores [1]. En los filtros activos se encuentran los filtros pasa-bajas que son dispositivos diseñados para permitir el paso de señales de bajas frecuencias mientras atenúa las señales de alta frecuencia, la definición de un filtro activo puede definirse un filtro como cualquier dispositivo que modifica de un modo determinado una señal que pasa a través de él. [2] Este tipo de circuitos son de suma importancia en la actualidad ya que tiene diversas aplicaciones en el área de electrónica, comunicaciones, así como en el procesamiento de señales.

Por otra parte, añadir un compensador en adelanto en un filtro pasa-bajas garantiza una mejor respuesta en frecuencia, mayor estabilidad del sistema, reducción de distorsión de fase, mayor velocidad de respuesta, reducción de la sobreoscilación en la respuesta del filtro, entre otras ventajas [3].

En el presente trabajo se utilizaron conocimientos adquiridos en el área de control para realizar un compensador en adelanto aplicado a un filtro pasa-bajas de configuración de red Sallen-Key [4] a la respuesta escalón a través de su comportamiento en sus tiempos característicos.

DESARROLLO

Diagrama de bloques del sistema a diseñar.

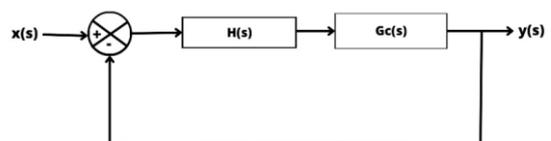


Figura 1. Diagrama de bloques.

Diseño del filtro pasa-bajas con configuración Sallen-Key.

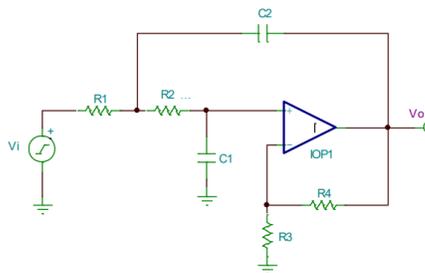


Figura 2. Filtro pasa-bajas Sallen-Key.

Para este trabajo se eligió un filtro pasa-bajas de segundo orden Sallen-Key [5], para el cual la función de transferencia está dada por:

$$\frac{V_o}{V_i} = H(s) = \frac{(1 + \frac{R_4}{R_3}) (\frac{1}{C_2 C_1 R_1 R_2})}{s^2 + s (\frac{1}{C_2 R_2} + \frac{1}{C_2 R_1} - \frac{R_4}{C_1 R_2 R_3}) + \frac{1}{C_2 C_1 R_1 R_2}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Como se desea que el filtro sea del tipo subamortiguado se debe de tener en cuenta que el factor de amortiguamiento ξ este en el rango de $0 < \xi < 1$, por lo tanto, se propone un factor de amortiguamiento de $\xi = 0.2$, con este dato se realizan los cálculos para obtener el factor de calidad Q el cual define el máximo sobreimpulso [6].

$$Q = \frac{1}{\xi} \quad \text{Ec. (2)}$$

$$Q = 5$$

Para obtener los valores de los componentes utilizados en el filtro de deben proponer valores para R_1, R_2, C_1 y C_2 . Y así obtener R_3 y R_4 como se muestra a continuación.

$$R_1 = R_2 = 1k\Omega \quad \text{Ec. (3)}$$

$$C_1 = C_2 = 100nF \quad \text{Ec. (4)}$$

$$Q = \frac{1}{3 - A_v}$$

$$5 = \frac{1}{3 - A_v}$$

$$A_v = -\frac{1}{5} + 3 = 2.8$$

$$A_v = \frac{R_4}{R_3} + 1$$

$$2.8 = \frac{R_4}{R_3} + 1$$

$$1.8 = \frac{R_4}{R_3}$$

$$1.8 = \frac{1.8k}{1k}$$

Se procede a calcular la frecuencia de polo con los valores de resistencia y capacitancia del sistema:

$$f_p = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi(1k)(100nF)}$$

$$f_p = 1591.54$$

De igual forma, en la Ec. (1) se sustituyen los valores de capacitancia y resistencia obteniendo así $H(s)$.

$$H(s) = \frac{280\,000\,000}{s^2 + 2000s + 100\,000\,000}$$

Se sustituyen los valores obtenidos por medio de los cálculos matemáticos, quedando el circuito de la siguiente forma:

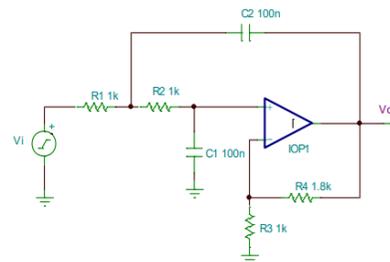


Figura 3. Filtro pasa bajas con valores de los componentes.

Simulación del filtro pasa bajas Matlab.

Como siguiente paso, se realizó el diagrama de Bode [7] en Matlab, se utilizaron el manual de básico de Matlab [8] para conocer la ganancia [9] y comprobar así, la respuesta en frecuencia del filtro pasa bajas.

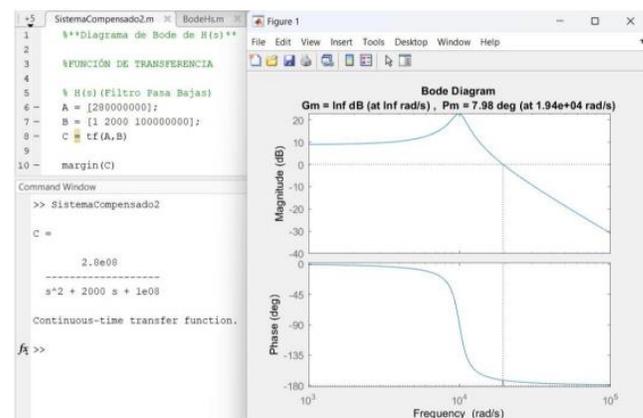


Figura 4. Diagrama de Bode de $H(s)$ en Matlab.

Simulación del filtro pasabajas en TINA

Se procede a armar el filtro en TINA [11] para obtener el diagrama de Bode y así corroborar de igual forma que los resultados obtenidos en Matlab son congruentes.

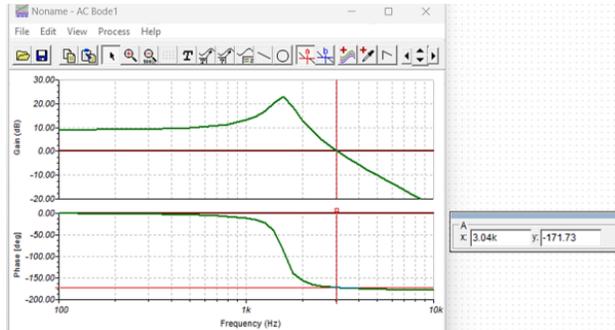


Figura 5. Diagrama de Bode de $H(s)$ en TINA.

En la Figura 5 se muestra que la fase del cruce por cero del filtro se encuentra -171.78° , por consecuencia el margen de fase es de 8.27° . Con esto se corrobora que ambos diagramas de Bode son correctos ya que el obtenido por Matlab arroja un margen de fase de 7.98° .

Diseño del compensador en adelanto

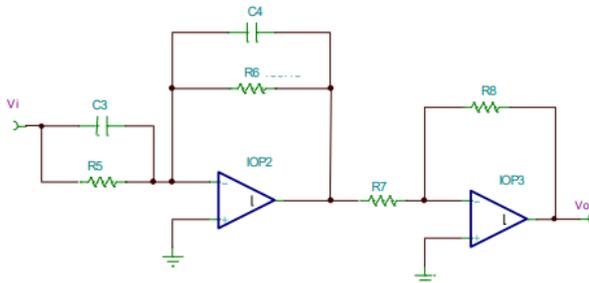


Figura 6. Diseño del compensador en adelanto.

La Figura 6 corresponde al diseño del compensador [3] que se le aplicará al filtro pasa-bajas. Su función de transferencia está dada por la ecuación (6).

$$G_C(s) = \frac{R_8 C_3}{R_7 C_4} \left(\frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\alpha T}} \right) \quad \text{Ec. (6)}$$

De acuerdo con los valores obtenidos por medio del diagrama de Bode en Matlab y TINA, se puede observar que el cruce por cero se encuentra en $19\,400 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$ que es igual a 3.1kHz; y el margen de fase $M_\phi = 7.98^\circ \approx 8^\circ$.

Dado que se desea un margen de fase de 40° , la diferencia es de 32° , al momento de realizar la compensación en adelanto, a 32° se le suma, por procedimiento, entre $5-12^\circ$, para que se aproxime al valor deseado, en el caso de

esta investigación se le añaden 6° , por cual, buscamos 38° . Con estos datos, realizamos el cálculo del factor α .

$$\alpha = \frac{1 - \sin 38^\circ}{1 + \sin 38^\circ} = 0.24 \quad \text{Ec. (7)}$$

Con la fórmula (8) se obtienen los decibelios que se necesitan para que el sistema aumente su ganancia en el diagrama de Bode.

$$20 \log \left(\frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right) \quad \text{Ec. (8)}$$

$$20 \log \left(\frac{1}{\sqrt{0.24}} \right) = 6.2 \text{ dB}$$

Teniendo este dato, en el diagrama de bode de la figura 5 se sitúa el cursor en -6.2 dB para obtener nuestra frecuencia de cruce ω_c .

$$\omega_c = 25\,900 \frac{\text{rad}}{\text{seg}} = 4.13 \text{ Hz.}$$

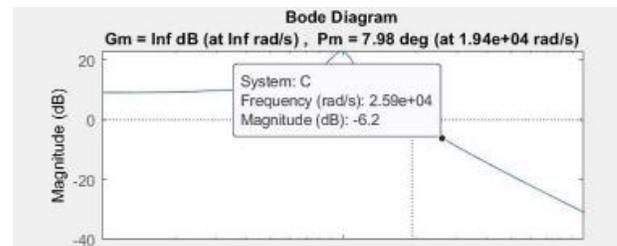


Figura 7. Localización de ω_c .

Con este dato, se continua con la obtención de las frecuencias de esquina correspondientes.

$$\frac{1}{T} = \sqrt{\alpha} \omega_c \quad \text{Ec. (9)}$$

$$\left(\sqrt{0.24} \right) (25\,900) = 12\,688.36$$

$$\frac{1}{\alpha T} = \frac{\omega_c}{\sqrt{\alpha}} = \frac{25\,900}{\sqrt{0.24}} = 52\,686.15 \quad \text{Ec. (10)}$$

De igual forma en la que se trabajó para el diseño del filtro, se calculan los valores de las resistencias y capacitores para el compensador, esto, con las fórmulas [2] que se muestran a continuación:

$$K_C = \frac{R_8 C_3}{R_7 C_4} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$K_\alpha = \frac{R_6 R_8}{R_5 R_7} \quad \text{Ec. (12)}$$

$$T = R_5 C_3 \quad \text{Ec. (13)}$$

$$\alpha T = R_6 R_5 \quad \text{Ec. (14)}$$

$$G_C(s) = \frac{R_6 R_8 R_5 C_3}{R_5 R_7 R_6 C_4} \quad \text{Ec. (15)}$$

Para los valores de capacitancia de C_4 y C_3 Se propone que sean igual a 100nF. De (13) se despeja R_5 y de (14) se despeja R_6 para así obtener el valor de las resistencias del compensador.

$$R_5 = \frac{T}{C_3} = \frac{1}{\frac{12\ 688.36}{100nF}} = 78.12\Omega$$

$$R_6 = \frac{\alpha T}{C_4} = \frac{52\ 868.15}{100nF} = 189.15\Omega$$

Se obtiene la ganancia del compensador:

$$K_C = \frac{R_8 C_3}{R_7 C_4} = \frac{(4.17k)(100nF)}{(1k)(100nF)} = 4.17$$

Se sustituyen los valores en (6) y se obtienen $G_C(s)$.

$$G_C(s) = 4.17 \left(\frac{s+12\ 688.36}{s+52\ 868.15} \right)$$

Finalmente se multiplica $G_C(s)$ por el sistema original para así obtener la ecuación del sistema ya compensado.

$$H(s)G_C(s) = \frac{280\ 000\ 000}{s^2 + 2000s + 100\ 000\ 000} \cdot 4.17 \left(\frac{s + 12\ 688.36}{s + 52\ 868.15} \right)$$

Simulación del filtro pasa-bajas multiplicado por el compensador en adelante en TINA

Se realiza la simulación en TINA del sistema compensado y se observa en el diagrama de bode que existe una compensación en adelante, respecto al filtro pasa bajas diseñado anteriormente. Para la entrada se considera una frecuencia de 100 Hz.

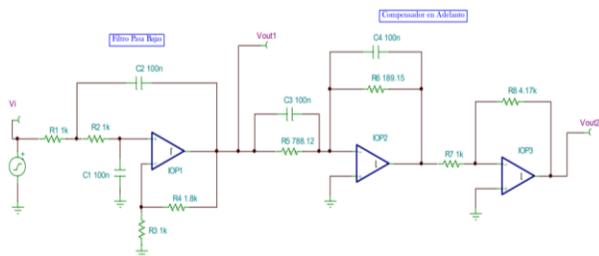


Figura 8. Diagrama del filtro con el compensador.

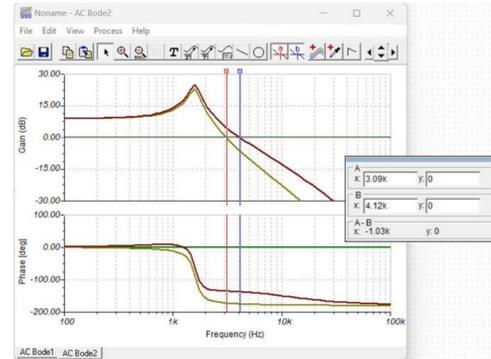


Figura 9. Diagrama de Bode del filtro pasabajas con el compensador.

Como se puede observar la respuesta en color amarillo corresponde al filtro pasa bajas, y situando el cursor en su cruce por cero se tiene una frecuencia de 3.08kHz. La respuesta en color rojo corresponde al sistema compensado con una frecuencia de 4.12kHz en su cruce por cero. Ambas frecuencias son las implementadas en los cálculos realizados anteriormente por lo que podemos comprobar que todo se ha realizado con éxito y se observa que existe una compensación en adelante en el filtro pasabajas.

Retroalimentación del sistema

Para la retroalimentación del sistema se coloca un sumador inversor en la entrada antes del filtro pasa-bajas. Por lo tanto, la entrada del sumador realizará la suma entre la señal de entrada, que será un escalón unitario, el cual es 0 para valores negativos de t y 1 para valores positivos de t [12], con la señal de salida del compensador de adelanto. La salida del sumador inversor se conecta a la entrada del filtro pasa bajas, y a la salida del compensador ya retroalimentado se conecta un inversor de ganancia unitaria para lograr visualizar correctamente la señal de salida deseada.

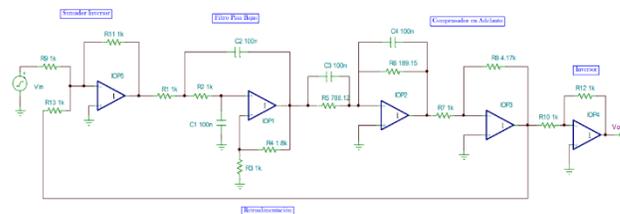


Figura 10. Sistema con retroalimentación.

Comprobación del sistema a diferentes frecuencias

A continuación, se realizarán las respectivas comprobaciones del sistema por medio de la conversión del voltaje de entrada a decibelios dB aplicando diferentes frecuencias, cada una de las frecuencias y voltajes serán corroboradas por medio de los softwares TINA y Matlab.

La fórmula para la conversión de voltaje a dB está dada por [13]:

$$dB = 20 \log \left(\frac{V_o}{V_i} \right) \quad \text{Ec. (16)}$$

1. Prueba 1.

Frecuencia en la señal de entrada de 1kHz, $V_i=2V$.

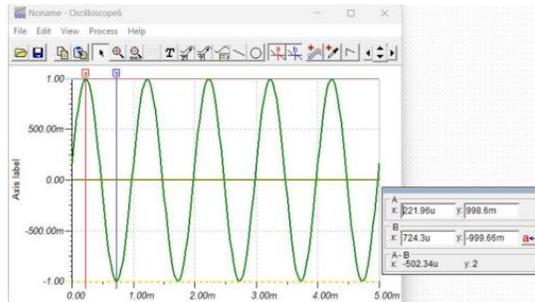


Figura 11. Señal de entrada a 1kHz.

Salida en filtro pasabajas.

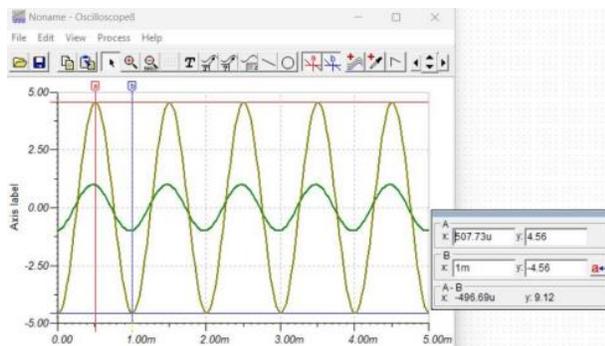


Figura 12. Señal de salida del filtro pasa bajas a 1kHz.

Como se puede observar el voltaje de salida corresponde a 9.12V, entonces su equivalencia en dB es:

$$dB = 20 \log \left(\frac{9.12V}{2V} \right) = 13.18 \text{ dB}$$

Salida del sistema ya compensado.

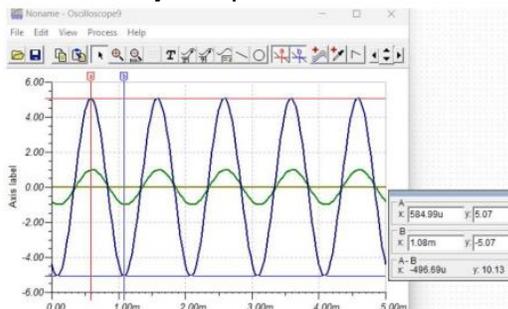


Figura 13. Señal de salida en el sistema compensado a 1kHz.

En la salida del sistema ya compensado se puede observar un voltaje de 10.13V, por lo tanto, su equivalencia en decibelios corresponde a:

$$dB = 20 \log \left(\frac{10.13V}{2V} \right) = 14.09 \text{ dB}$$

Diagrama de Bode obtenido en TINA

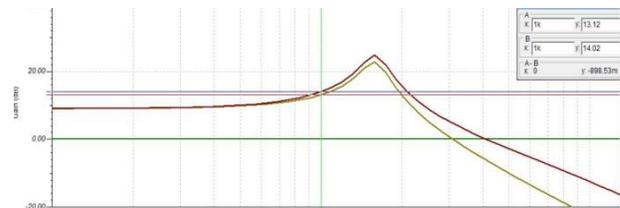


Figura 14. Respuesta en Bode en 1kHz.

En la Figura 14, se pueden observar dos respuestas, una amarilla que corresponde al filtro pasa-bajas, y otra roja que corresponde al sistema ya compensado. Se ubica el cursor “a” y el cursor “b” en la respuesta del filtro pasa-bajas a 1kHz, así como en el sistema ya compensado, como resultado obtenemos 13.12 dB en la respuesta del filtro pasa-bajas, y 14.02 dB en la respuesta del sistema ya compensado, de esta forma se corroboran que los cálculos matemáticos y los datos obtenidos con TINA son los mismos.

Diagrama de Bode obtenido en Matlab.

Debido a que 1 kHz corresponde a 6,283 rad/s, el cursor se ubica a esta frecuencia tanto en el diagrama de Bode del filtro pasa-bajas como en el sistema compensado, como se puede observar en la Figura 15 y la Figura 16. En ambos casos, las ganancias coinciden con las obtenidas previamente mediante TINA y análisis matemáticos.

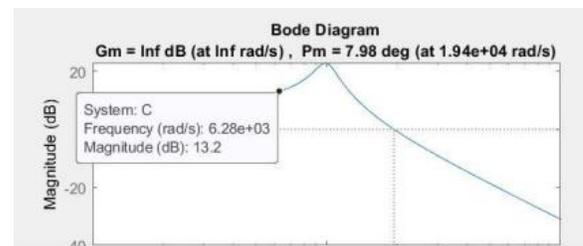


Figura 15. Ganancia en Bode del filtro pasabajas a 6 283 rad/s en Matlab.

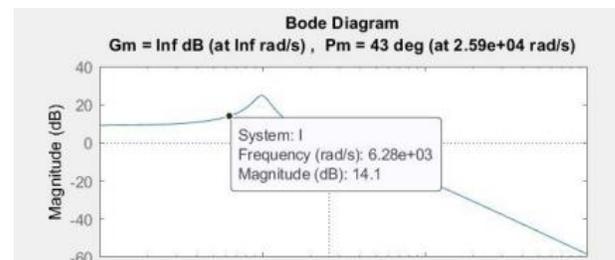


Figura 16. Ganancia en Bode del sistema compensado a 6 283 rad/s en Matlab.

2. Prueba 2

Frecuencia en la señal de entrada de 1.6kHz, $V_i=1.99V$.

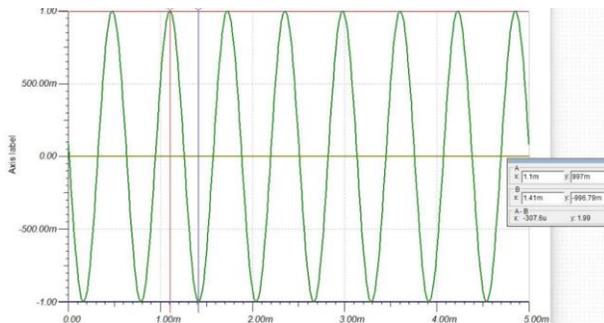


Figura 17. Señal de entrada a 1.6kHz.

Señal de salida en el filtro pasa-bajas.

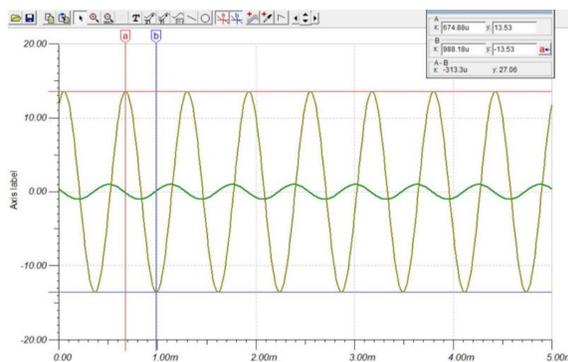


Figura 18. Señal de salida en el filtro pasabajas a 1.6kHz.

Como se puede observar en voltaje de salida en la gráfica el voltaje de salida corresponde a 27.06V, entonces se tiene que:

$$dB = 20 \log \left(\frac{27.06V}{1.99V} \right) = 22.67 \text{ dB}$$

Salida en el sistema compensado.

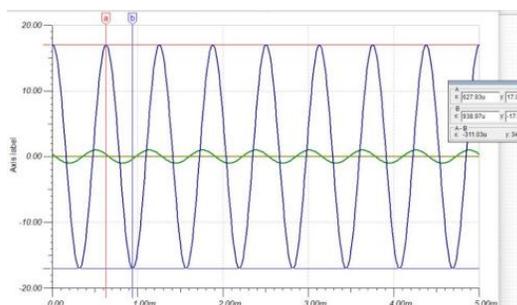


Figura 19. Señal de salida en el sistema compensado a 1.6kHz.

El voltaje de salida corresponde a 34.07 V, entonces se obtiene:

$$dB = 20 \log \left(\frac{34.07V}{1.99V} \right) = 24.67 \text{ dB}$$

Respuesta del diagrama de Bode en TINA.

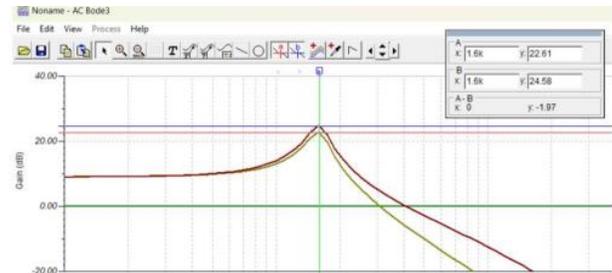


Figura 20. Respuesta de ganancia en Bode a 1.6kHz en TINA.

Como se puede observar en la Figura 20, la respuesta en color amarillo corresponde al filtro pasa bajas y la de color rojo al sistema compensado. Ubicando el “cursor a” en la respuesta del filtro a 1.6kHz se obtiene una ganancia de 22.61 dB, y situando el “cursor b” en la respuesta del sistema compensado a 1.6kHz se obtiene una ganancia de 24.58 dB.

Respuesta del diagrama de Bode en Matlab.

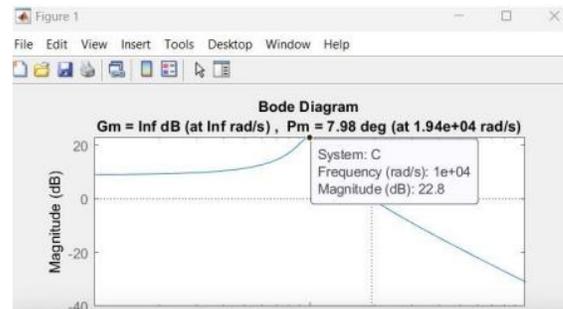


Figura 21. Respuesta en Bode del filtro pasabajas en Matlab a 10 053 rad/s en Matlab.

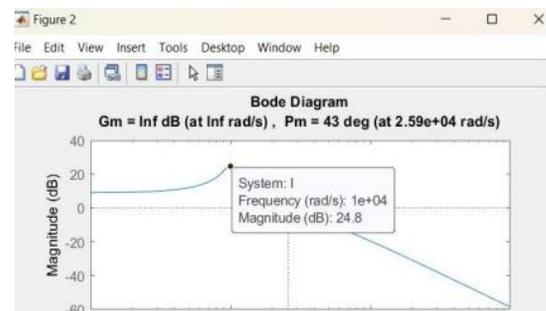


Figura 22. Respuesta en Bode para la ganancia del sistema compensado en 10 053 rad/s en Matlab.

Ya que 1.6kHz corresponde a 10 053 rad/s, se ubica esta frecuencia en el diagrama de Bode del filtro pasa bajas el cual muestra una magnitud de 22.8 dB, mientras que el sistema compensado a esta frecuencia nos da una magnitud de 24.8 dB.

3. Prueba 3.

Frecuencia en la señal de entrada de 3.8kHz con un voltaje de $V_i=2V$.

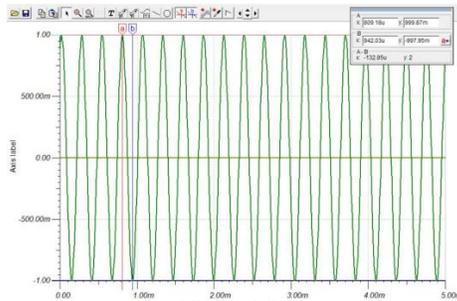


Figura 23. Señal de entrada a 3.8kHz.

Salida en filtro pasabajas.

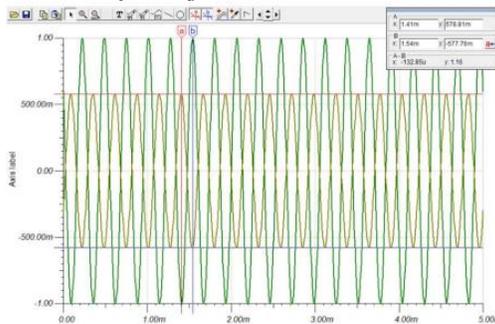


Figura 24. Señal de salida del filtro pasa-bajas a 3.8kHz.

El voltaje de salida corresponde a 1.16 V, entonces se tiene que:

$$dB = 20 \log \left(\frac{1.16VV}{2V} \right) = -4.73 \text{ dB}$$

Salida en del sistema compensado.

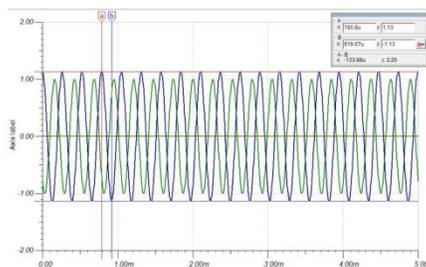


Figura 25. Señal de salida del sistema compensado 3.8kHz.

El voltaje de salida corresponde a 2.26 V, entonces se tiene que:

$$dB = 20 \log \left(\frac{2.26VV}{2V} \right) = -1.1 \text{ dB}$$

Respuesta del diagrama de Bode en TINA.

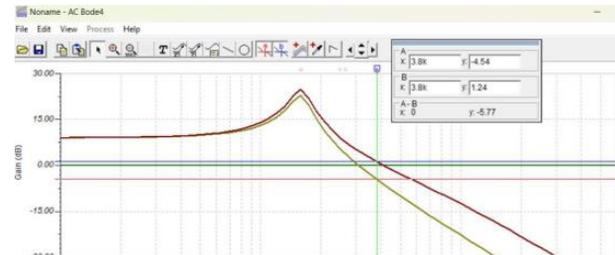


Figura 26. Respuesta de ganancia en Bode a 3.8kHz en TINA.

Como se puede observar en la Fig. 26, la respuesta en color amarillo corresponde al filtro pasa bajas y la de color rojo al sistema compensado. Ubicando el “cursor a” en la respuesta del filtro a 3.8kHz se obtuvo una ganancia de -4.54 dB, y situando el “cursor b” en la respuesta del sistema compensado a 3.8kHz se obtuvo una ganancia de 1.24 dB.

Respuesta del diagrama de Bode en Matlab.

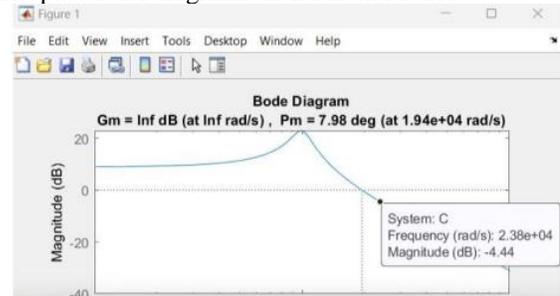


Figura 27. Respuesta de ganancia en Bode del filtro pasabajas a 23 876 rad/s en Matlab.

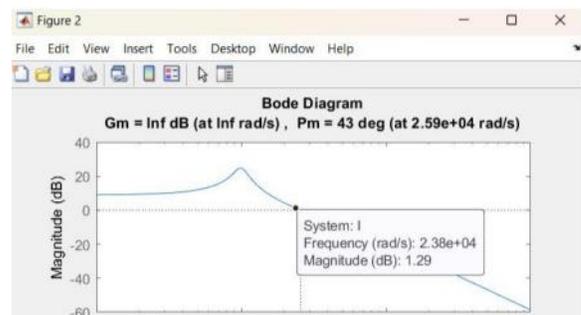


Figura 28. Respuesta de ganancia en Bode del filtro compensado a 23 876 rad/s en Matlab.

Ya que 3.8kHz corresponde a 23876 rad/s, se ubica esta frecuencia en el diagrama de Bode del filtro pasa bajas el cual muestra una magnitud de -4.44 dB, mientras que el sistema compensado a esta frecuencia se obtuvo una magnitud de 1.29 dB.

Con esto se puede comprobar que, en las cinco pruebas realizadas con diferentes frecuencias, los valores obtenidos aplicando la fórmula de conversión de voltaje a dB, como los valores obtenidos visualizando los diagramas de bode en Tina-TI y en Matlab son aproximados, por lo que se demuestra que tanto el diseño del filtro pasa bajas como del compensador en adelante se realizó correctamente.

Respuesta del sistema ante una entrada escalón

A continuación, se muestra la respuesta del filtro pasabajas sin compensar, así como compensado ante una entrada escalón, esto para corroborar que el sistema compensado reduce las oscilaciones, de igual forma se muestra la respuesta del sistema retroalimentado.

Respuesta del filtro pasabajas sin compensar en Matlab.

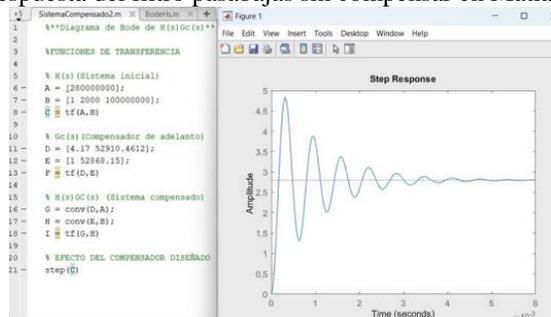


Figura 29. Respuesta del filtro pasa bajas sin compensar en Matlab.

Respuesta del filtro pasa bajas compensado en Matlab.

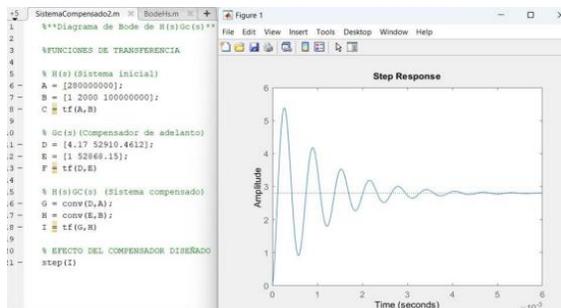


Figura 30. Respuesta del filtro pasa bajas compensado en Matlab.

Respuesta del sistema retroalimentado en Matlab.

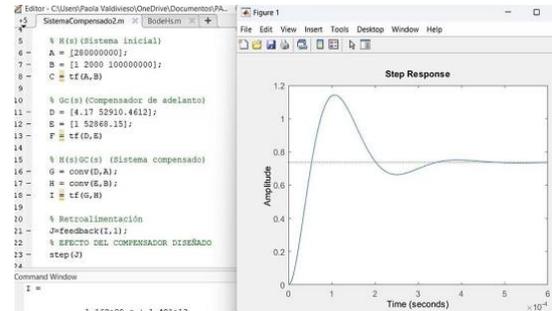


Figura 31. Respuesta del sistema retroalimentado en Matlab.

Respuesta del filtro pasa bajas sin compensar en TINA.

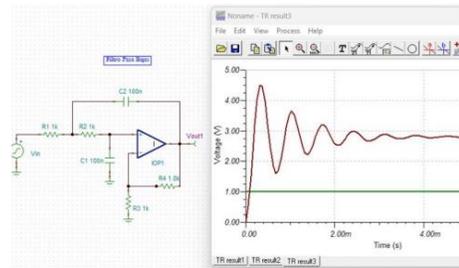


Figura 32. Respuesta del filtro pasabajas sin compensar en TINA.

Respuesta del filtro pasabajas compensado en TINA.

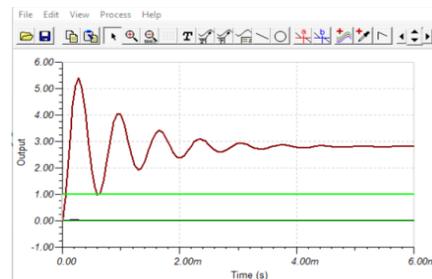


Figura 33. Respuesta del filtro pasabajas compensado en TINA.

Señal del sistema retroalimentado en TINA.

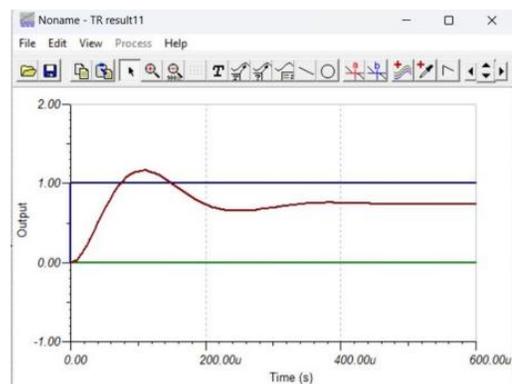


Figura 34. Respuesta del sistema retroalimentado en TINA.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez que se terminó el diseño del compensador en frecuencia se realizaron varias pruebas, en este documento se presentan 5 de ellas y en cada una de las pruebas se realizó la comparativa correspondiente con el análisis matemático, de software y de simulación electrónica en los cuales se encontró una congruencia respecto a cada una de las salidas correspondientes a cada frecuencia, después se aplicó una entrada escalón para corroborar que el análisis aplicado en frecuencia también aplica para la suavización de los tiempos característicos ya conocidos, como lo son, el tiempo pico [14], el tiempo de asentamiento y el tiempo de elevación. El cambio de estos tiempos se puede observar en las figuras 29-34 en donde se puede observar claramente una suavización de la respuesta al escalón de un filtro Sallen- Key compensado.

Se observa también la reducción del sobrepico, el cual es el máximo valor instantáneo en el que la respuesta excede el valor final [15] logrando así, una mejora en la respuesta del filtro ante una función escalón.

Investigaciones referentes al plasmado en este documento han trabajado con distintos métodos utilizados en la teoría de control, por mencionar algunos; se han diseñado algoritmos de control en los que se modifica la respuesta al escalón a partir del método de bode utilizando LGR aplicado a un motor de CD en lazo cerrado [16], se ha propuesto sistemas de control para manipular la ubicación de la respuesta a la dirección del eje de un embobinado en corriente directa [17], se ha también implementado un control Proporcional Integral Derivativo sintonizando sus parámetros por el método de Ziegler-Nichols [17]

CONCLUSIONES

En conclusión, la incorporación de un compensador en adelanto en un filtro pasa-bajas proporciona una mejora sustancial en la estabilidad y en la respuesta transitoria del sistema, al aumentar la fase en la frecuencia de corte deseada. Esto se traduce en una respuesta más rápida y amortiguada, reduciendo los efectos de oscilación y sobre pico. Además, la capacidad de retroalimentación ofrece la flexibilidad necesaria para ajustar la respuesta del filtro según las necesidades específicas, ya sea para mejorar la atenuación en ciertas frecuencias o para adaptar la respuesta en frecuencia de acuerdo con requisitos particulares. En resumen, el diseño de un filtro pasa bajos con un compensador en adelanto y retroalimentación puede proporcionar beneficios significativos en términos de estabilidad, respuesta transitoria y ajuste de la respuesta en frecuencia. Sin embargo, es importante destacar que la efectividad y el rendimiento exacto dependerán ambos de los parámetros de diseño seleccionados y las características específicas del sistema en cuestión. En trabajos futuros se analizará la

compensación en retraso y mixta para realizar la comparativa correspondiente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wilaeba, E. (24 de septiembre de 2018). Filtro Pasa bajos Activo de 2do Orden Sallen Key. Recuperado de: <https://wilaebaelectronica.blogspot.com/2017/01/filtro-pasa-bajos-activo-de-2do-orden-sallen-key.html>
- [2] Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. (Ed.8), pp. 269-511. Madrid, España: Pearson educación S.A.
- [3] Hernández, G. R. (2010). Introducción a los sistemas de control. (Ed.1), pp. 401-440. México: Pearson educación S.A.
- [4] Miyara, F. (2004). Filtros activos. Cátedra de Electrónica III FCEIA-UNR. Rosario.
- [5] Fernández, M. C. (2009). Manual básico de Matlab. Edit. Complutense, Madrid.
- [6] Schunke, A. C., Bromiley, P. A., Tautz, D., & Thacker, N. A. (2012). TINA manual landmarking tool: software for the precise digitization of 3D landmarks. *Frontiers in Zoology*, 9, 1-6.
- [7] Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2003). Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. PEARSON educación.
- [8] Malvino, A. P., & Bates, D. J. (1991). Principios de electrónica (Vol. 6). McGraw-Hill.
- [9] Golnaraghi, F. y Kuo, BC (2017). Sistemas de control automático. Educación McGraw-Hill.
- [10] Guzmán, J., Costa, R., Berenguel, M., & Dormido, S. (2012). Control automático con herramientas interactivas. Pearson.
- [11] Graebe, GCGSF y Salgado, ME (2000). Diseño de sistemas de control.
- [12] CORTÉS, J. A., CHAVES, J. A., & QUINTERO, E. A. (2011). Generación de señales senoidales mediante PWM y filtros activos de segundo orden. *Scientia et technica*, 17(47), 6-11.
- [13] Spence, R. y Soin, RS (1997). Diseño de tolerancia de circuitos electrónicos. Científico mundial.
- [14] Floyd, T. L. (2008). Dispositivos electrónicos.
- [15] Dorf, R. C., Bishop, R. H., Canto, S. D., Canto, R. D., & Dormido, S. (2005). Sistemas de control moderno (pp. 37-310). Pearson Educación.
- [16] Orlando, S. V., & Rosario, L. O. M. Diseño de un compensador en adelanto por medio del criterio de estabilidad de bode para controlar el desplazamiento de un motor de CD.
- [17] N. Thomas, P. Poongodi. (2009, Julio 1-3). "Position Control of DC Motor Using Genetic Algorithm Based PID Controller". [En línea]. Disponible en: http://iaeng.org/publication/WCE2009/WCE2009_pp1618-1622.pdf
- [18] D.T. Liem, D.Q. Troung, K.K. Ahn. (2015, Enero 4). "A torque estimator using online tuning grey fuzzy PID for applications to torque-sensorless control of DC

motors”. [En línea]. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957415815000136>

ROLES DE CONTRIBUCIONES

Rol	Autor (es)
Dirección de la investigación	César Hernández Sánchez
Metodología	Aries Andreina Anguera Hernández César Hernández Sánchez
Conceptualización	César Hernández Sánchez
Recursos	César Hernández Sánchez
Software	Jared Elí Gonzáles Arellanes Aries Andreina Anguera Hernández
Supervisión	César Hernández Sánchez Arturo Domínguez Ramírez
Validación	César Hernández Sánchez. Franco Gabriel Caballero Julián
Visualización	Aries Andreina Anguera Hernández. Franco Gabriel Caballero Julián Jared Elí Gonzáles Arellanes
Redacción	César Hernández Sánchez Aries Andreina Anguera Hernández Jared Elí Gonzáles Arellanes.



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