

Compensador en adelanto para un modulador AM transistorizado con análisis en frecuencia Lead compensator for a transistorized AM modulator with frequency analysis

López López Elí Azael¹, Sosa Cruz Pablo Moisés², Sanchez Santiago Pedro³, Caballero Julián Franco Gabriel⁴,
Hernández Sánchez César⁵

<https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v8i1.365>

¹21160374@itoaxaca.edu.mx, orcid ID 0009-0006-4973-3100, Tecnológico Nacional de México/IT de Oaxaca
²21160406@itoaxaca.edu.mx, orcid ID 0009-0007-3907-7020, Tecnológico Nacional de México/IT de Oaxaca
³pedro.sanchez@itoaxaca.edu.mx, orcid ID 0009-0005-7223-0280, Tecnológico Nacional de México/IT de Oaxaca
⁴franco.caballero@itoaxaca.edu.mx, orcid ID 0000-0002-5024-7759, Tecnológico Nacional de México/IT de Oaxaca
⁵cesar.hernandez@itoaxaca.edu.mx, orcid ID 0009-0002-2890-8099, Tecnológico Nacional de México/IT de Oaxaca

Resumen -- En este documento se aborda la elaboración y diseño de un compensador en adelanto aplicado a un Modulador AM para mejorar la estabilidad y respuesta transitoria, además de que optimiza el desempeño del sistema al minimizar la sobre oscilación y mejorar la velocidad de respuesta, además, permite aumentar el ancho de banda de transmisión.

Palabras Clave: Análisis en frecuencia, Compensador, Modulador AM.

Abstract -- This document focuses on the development and design of a lead compensator applied to an AM Modulator with the aim of enhancing its stability and transient response. Furthermore, it seeks to optimize the system's performance by minimizing overshoot and improving response speed.

Key words --Frequency analysis, Compensator, AM modulator.

Introducción

En este informe, se aborda la aplicación de un compensador de adelanto en un modulador de amplitud (AM) con el objetivo de mejorar la estabilidad y la respuesta en frecuencia del sistema. El contexto de estudio se centra en los desafíos asociados con la presencia de ciertos desfases en la señal AM, que pueden afectar negativamente su calidad y eficiencia. Para abordar esta problemática, se explora la implementación de un compensador de adelanto, destacando su capacidad para introducir fase positiva en la respuesta en frecuencia del sistema. Este enfoque se traduce en beneficios tangibles, como la mejora en la selectividad de la frecuencia y la minimización de la distorsión armónica, mejorando así la calidad global de la modulación AM. 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 modulador AM con análisis en frecuencia.

Planteamiento del problema

La teoría de control eléctrico es esencial en la ingeniería electrónica, especialmente en el diseño y

análisis de sistemas de control para regular el comportamiento de sistemas eléctricos.

Existen diversas investigaciones sobre los compensadores analógicos en adelanto y atraso, como los estudios de Milocco [1] y Quintero et al. [2] aplicados a diferentes sistemas en lazo cerrado. Sin embargo, este estudio se distingue al aplicarse a un modulador AM en análisis de frecuencia. Su objetivo es mejorar el comportamiento de la señal modulada, buscando incrementar la estabilidad y la respuesta transitoria del sistema.

El desafío principal reside en desarrollar herramientas efectivas para mejorar la estabilidad y el rendimiento de la señal moduladora mediante técnicas de control. Una de estas técnicas es la aplicación de compensadores en adelanto, dispositivos que modifican la respuesta del sistema en función de la frecuencia para mejorar su estabilidad y velocidad de respuesta.

Según Franklin et al. [3], los compensadores de adelanto y atraso siguen siendo utilizados en el control de diversos sistemas reales, lo que los convierte en un tema esencial en la enseñanza de control.

Justificación

- **Entendimiento de los compensadores en adelanto:** Los compensadores en adelanto son componentes fundamentales en el diseño de sistemas de control. Al aplicarlos a un modulador, los estudiantes pueden comprender cómo estos compensadores pueden mejorar la estabilidad y el rendimiento del sistema.
- **Importancia de la modulación AM:** La modulación de amplitud (AM) es una técnica fundamental en telecomunicaciones, utilizada ampliamente en la transmisión de señales de audio y datos. Mejorar su estabilidad y calidad es crucial para garantizar una comunicación efectiva.

Objetivo

Construir un compensador en adelanto a través del análisis en frecuencia con diagramas de Bode aplicado a un Modulador AM, el cual aumentará el margen de ganancia y de fase además de la minimización

de la sobre oscilación, en consecuencia, la estabilidad global del sistema.

Alcance

Este proyecto al ser didáctico está dirigido para los estudiantes y docentes de ingeniería electrónica del instituto tecnológico de Oaxaca que cursen la materia de control II.

Limites

Disponibilidad de herramientas especializadas para observar el comportamiento de las señales eléctricas producidas por el compensador.

Limitado a pruebas de laboratorio con señales sinusoidales y cuadradas.

Objetivos Específicos

- Realizar los cálculos pertinentes para la elaboración del compensador de acuerdo a las características que se requieran modificar el comportamiento del Modulador.
- Analizar los resultados experimentales del funcionamiento del compensador y, si es necesario, ajustar los parámetros para optimizar su rendimiento.
- Implementar el compensador diseñado en un prototipo físico del Modulador y realizar pruebas experimentales para verificar su eficacia en la mejora del margen de ganancia y la estabilidad del sistema.
- Documentar adecuadamente el proceso de diseño, implementación y pruebas del compensador en adelante.

Marco Teórico

Antecedentes de los compensadores eléctricos

Los compensadores en adelante son herramientas esenciales en el control de sistemas dinámicos, diseñados para mejorar la estabilidad y la respuesta transitoria. Se basan en agregar fase adelantada en la respuesta en frecuencia del sistema para contrarrestar retrasos y aumentar el margen de fase, lo que reduce oscilaciones indeseadas. Su diseño implica seleccionar cuidadosamente la frecuencia de corte y la cantidad de fase a agregar mediante análisis de frecuencia como el diagrama de Bode. Son ampliamente utilizados en sistemas de control, electrónica y comunicaciones, especialmente cuando se busca mejorar la estabilidad y la respuesta dinámica sin introducir amortiguamiento excesivo.

Importancia del diseño de un compensador

La importancia de utilizar un compensador en adelante radica en su capacidad para mejorar la estabilidad y la respuesta dinámica de un sistema de control. Estos dispositivos aumentan el margen de fase del sistema, aceleran la respuesta transitoria, reducen oscilaciones no deseadas y mejoran el rendimiento en

sistemas de lazo cerrado. Además, permiten un diseño más eficiente al alcanzar los requisitos de rendimiento con menos componentes. En resumen, los compensadores en adelante son cruciales para garantizar la estabilidad y la eficacia de los sistemas de control.

Modulación AM

La modulación de amplitud (AM) es una técnica de telecomunicaciones donde la amplitud de una onda portadora se ajusta de acuerdo con la señal de entrada que se desea transmitir. Esta señal moduladora lleva la información que se quiere enviar, como voz o datos. En el extremo receptor, la señal se demodula para recuperar la información original. Aunque es simple, la AM es susceptible al ruido e interferencias, limitando su uso en aplicaciones que requieren alta calidad de señal.

Es común en la radiodifusión de señales de audio, como estaciones de radio AM.

Diagrama Bode

El gráfico de Bode es una herramienta esencial en ingeniería para analizar la respuesta de amplitud y fase de un sistema en función de la frecuencia. Consiste en dos diagramas: uno que muestra la ganancia del sistema en escala logarítmica y otro que muestra el desfase de la salida respecto a la entrada en función de la frecuencia. Estos gráficos son cruciales para comprender cómo un sistema responde a diferentes frecuencias y para diseñar soluciones como compensadores. Permiten identificar problemas de estabilidad y retrasos que necesitan corrección en sistemas de control y electrónicos.

Consideraciones para el diseño de compensadores

Al diseñar un compensador en adelante, es esencial considerar lo siguiente:

- Margen de fase y ganancia: Asegurarse de aumentar el margen de fase sin afectar la ganancia en la frecuencia de interés.
- Frecuencia de cruce: Introducir suficiente fase adelantada en la frecuencia de cruce para mejorar la estabilidad.
- Tipo de compensador: Elegir entre diferentes tipos según los requisitos del sistema y la respuesta deseada.
- Amplitud de la señal: Diseñar para manejar la amplitud de la señal sin distorsión.
- Implementación práctica: Considerar la disponibilidad de componentes y la complejidad del diseño para una implementación exitosa.

Tipos de compensadores

○ Adelanto

Un compensador en adelante es un dispositivo usado en sistemas de control para mejorar la estabilidad y respuesta transitoria. Introduce

fase adelantada en la respuesta en frecuencia del sistema, aumentando el margen de fase y mejorando la estabilidad. Su diseño implica ajustar parámetros como la frecuencia de cruce y la cantidad de fase adelantada. En resumen, ayuda a mantener la estabilidad del sistema y reducir oscilaciones no deseadas.

- **Retardo**

Un compensador en retardo, o compensador de fase atrasada, es un dispositivo utilizado en sistemas de control para mejorar la estabilidad y el rendimiento del sistema. Introduce una fase atrasada en la respuesta en frecuencia del sistema, lo que ayuda a disminuir el margen de fase y mejorar la estabilidad. Su diseño implica ajustar parámetros como la frecuencia de cruce y la cantidad de fase atrasada. En resumen, ayuda a mejorar la estabilidad del sistema y reducir la sobrecompensación.

- **Adelanto-Retardo**

Un compensador adelanto-retardo, también conocido como compensador de fase adelantada-atrasada, es un dispositivo utilizado en sistemas de control para mejorar la estabilidad y respuesta transitoria. Combina características de compensadores en adelanto y en retardo, introduciendo fase adelantada y atrasada en la respuesta en frecuencia del sistema. Esto permite ajustar tanto el margen de fase como la velocidad de respuesta del sistema de manera más precisa. Su diseño implica ajustar parámetros como la frecuencia de cruce y la cantidad de fase adelantada y atrasada. En resumen, este tipo de compensador ofrece una mayor flexibilidad en el control del sistema, optimizando tanto la estabilidad como la respuesta transitoria.

DESARROLLO

Materials:

- 8 amplificadores operacionales LM741
- 9 Resistores de 10kΩ
- 7 Resistores de 100kΩ
- 2 Resistores de 900Ω
- 3 Resistor de 20kΩ
- 3 Resistor de 1kΩ
- 1 Resistores de 470Ω
- 1 Resistores de 5.1kΩ
- 1 Capacitores electrolíticos de 1uF
- 1 Capacitores cerámicos de 100nF
- 3 Capacitor cerámico de 10nF
- 1 Capacitor cerámico de 1nF
- 1 Transistor 2N2222A
- 1 Microcontrolador ESP-32

Asignación del circuito de modulación AM

Este circuito fue asignado por el catedrático donde se nos dio las especificaciones de construcción del circuito el cual consiste en un transistor, resistores y capacitores. Se nos asignó esta configuración con el propósito de obtener una función de transferencia específica, donde la entrada es la señal moduladora y la salida es la señal demodulada, con la finalidad de analizar cómo afecta una señal portadora de 500 kHz a la señal de entrada en relación a la fase y amplitud. En la figura 1 se muestra el circuito realizado

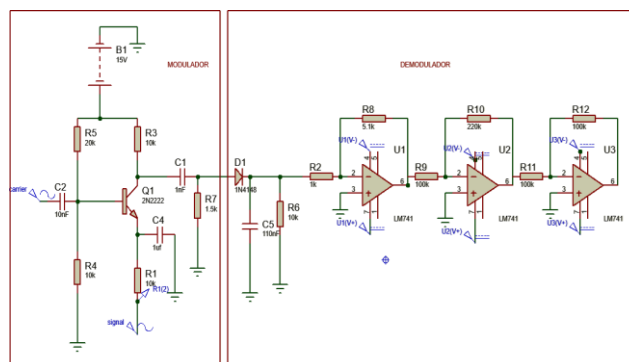


Figura. 1. Circuito asignado.

Obtención de la función de transferencia del circuito Modulador AM

Para obtener la función de transferencia fue necesario realizarla a través de un método experimental, en el cual se ingresó una señal de entrada con diferentes frecuencias desde el orden de los Hertz hasta los Kilo Hertz, se midió su amplitud en decibelios y su fase en grados utilizando un osciloscopio digital, de tal manera que a cada frecuencia de entrada le corresponden dos datos de salida. Sin embargo, para la obtención de la función de transferencia se necesitan las frecuencias en radianes sobre segundo, por lo que python fue la herramienta utilizada para procesar estas conversiones y posteriormente graficar los datos.

```
amplitud = [6.44, 6.44, 6.44, 6.44, 6.44, 6.44, 6.44, 6.44, 6.44,
6.44, 6.44, 6.3, 6.3, 6.3, 5.87, 5.57, 5.26, 5.14, 4.77,
4.43, 1.33, -1.58, -4.43, -7.39, -9.89, -12.39, -14.57,
-16.28, -18.17, -29.54, -32.64, -32.64, -32.64, -32.64,
-32.64, -32.64, -32.64, -32.64]

frecuencia = [1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 300, 400,
500, 600, 700, 800, 900, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000,
6000, 7000, 8000, 9000, 10000, 20000, 30000, 40000,
50000, 60000, 70000, 80000, 90000, 100000]

fase=[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -11, -23, -25.92, -28.8, -34.56, -37.8,
-40.32, -48.6, -50.4, -83.52, -103.68, -138.24,
-154.8, -172.8, -176.4, -201, -201, -208.9, -208.9, -208.9,
-208.9, -208.9, -208.9, -208.9, -208.9, -208.9, -208.9, -208.9]

radianes=[]

for i in (frecuencia):
    radianes.append(i/(2*math.pi))#pasamosde Hz a rad/seg
```

Figura. 2. Análisis de datos con python.

Con los datos obtenidos de manera experimental se propusieron asíntotas que al sumarse resultan en una gráfica que se aproxima a los resultados reales.

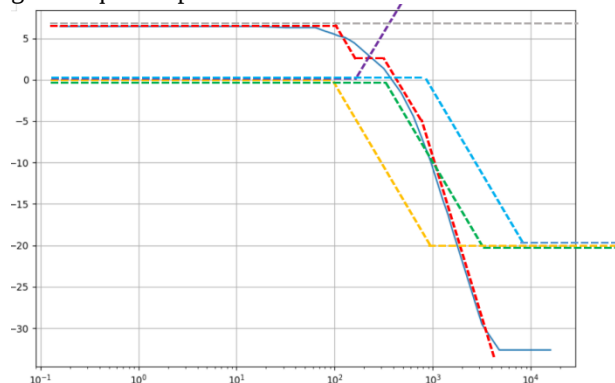


Figura. 3. Asíntotas propuestas.

Al conocer las frecuencias de corte de las asíntotas propuestas es posible obtener la ecuación en el dominio de Laplace de cada una de las componentes.

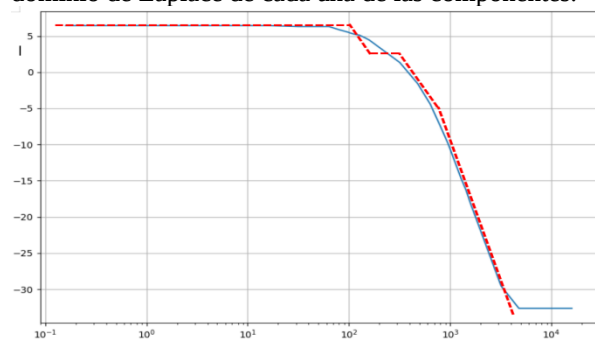


Figura. 4. Gráfica resultante a partir de asíntotas propuestas.

La función de transferencia final contiene tres polos y un cero.

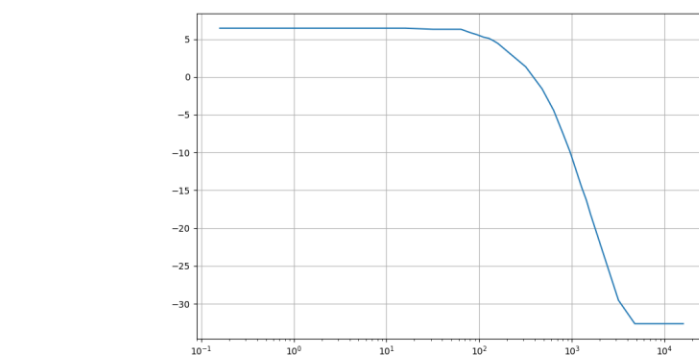
$$G(s) = \frac{2.1 \left(1 + \frac{s}{6283}\right)}{\left(1 + \frac{s}{5026}\right) \left(1 + \frac{s}{12566}\right) \left(1 + \frac{s}{32044}\right)} \quad \text{Ec. (1)}$$

Gráfica de Bode del sistema

Una vez obtenida la función de transferencia del sistema de modulación AM se procedió a obtener su respectivo diagrama de Bode, para ello se utilizó el software Matlab donde se ingresaron los datos que describe la función de transferencia, en la figura 2 se muestra el código ingresado en Matlab.

```
s = tf('s')
f = (1*2.1*(1+(s/6283)))/((1+(s/5026.39))*(1+(s/12554.13))*(1+(s/32044.24)))
figure(1)
margin(f)
```

Figura 5. Código para obtener la gráfica de Bode



➤ Diagrama de Bode obtenida experimentalmente.

Figura. 6. Diagrama de Bode del circuito con datos experimentales.

➤ Diagrama de Bode en Matlab

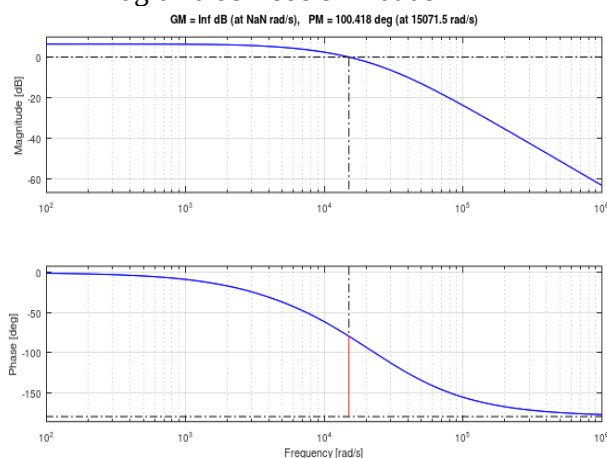


Figura. 7. Diagrama de Bode obtenida en Matlab.

Después de obtener la gráfica utilizando Matlab, procedimos a compararla con los datos obtenidos a través del método experimental. El propósito de esta comparación era verificar si ambas gráficas coincidían y así comprobar que la obtenida experimentalmente estaba correcta ya que esta rige la función de transferencia del sistema, una vez comprobada procedimos a realizar el compensador.

Diseño del compensador en Adelanto.

Para diseñar el compensador, se siguieron los pasos descritos en el libro "Ingeniería de Control Moderna" de Ogata, 5ta edición [4]. El libro establece que la función principal del compensador de adelanto es ajustar la respuesta en frecuencia para proporcionar un ángulo de fase adelantado necesario para contrarrestar el excesivo retardo de fase inherente a las componentes del sistema. Los pasos son los siguientes:

- Se da la ecuación que describe al compensador en adelante la cual es:

$$G(S) = K \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde primero tuvimos que hallar el valor de la ganancia K que satisfaga el requisito sobre la constante estática de error propuesta por nosotros el cual fue $K_v = 3765.71 \text{ seg}^{-1}$. Para hallar K se utilizó la siguiente ecuación

$$\lim_{s \rightarrow 0} s G_c(S)G(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s K \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \quad \text{Ec. (3)}$$

Sustituyendo la ecuación se obtiene:

$$3765.71 = \lim_{s \rightarrow 0} s K \frac{2.1 \left(1 + \frac{s}{6283}\right)}{\left(1 + \frac{s}{5026}\right) \left(1 + \frac{s}{12566}\right) \left(1 + \frac{s}{32044}\right)} \quad \text{Ec. (4)}$$

Al evaluar el límite, nos encontramos con una indeterminación, por lo que recurrimos a la regla de L'Hôpital. Esta regla nos permitió obtener el valor de la ganancia K quedando

$$K = 3.49$$

- Una vez de haber obtenido el valor de la ganancia K el siguiente paso fue realizar el diagrama de Bode multiplicando la ganancia K obtenida por la función de transferencia del sistema. El diagrama de Bode la obtuvimos en Matlab con el siguiente código.

```
s = tf('s')
f1 = (3.49*2.1*(1+(s/6283)))/((1+(s/5026.39))*(1+(s/12564.13))*(1+(s/32044.24)))
figure(1)
margin(f)
```

Figura 8. Código Matlab para obtener el diagrama de Bode con la ganancia K.

El diagrama de Bode resultante es el siguiente:

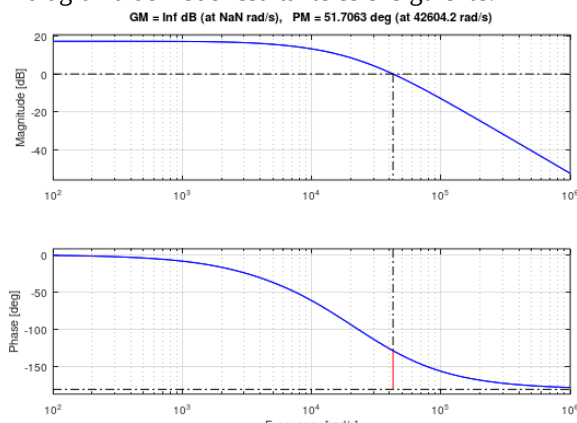


Figura 9. Diagrama de Bode con la ganancia K

- El tercer paso que realizamos fue sumarle una fase adicional que fuera de 5° a 12° , este rango se establece en el libro de Ingeniería de control moderno del autor K. Ogata por lo que en nuestro caso fue de 12°

$$\phi_m = 70^\circ - 51.7^\circ + 12^\circ = 30.3^\circ \quad \text{Ec. (5)}$$

- El siguiente paso fue determinar el factor de atenuación α la cual calculamos con la siguiente ecuación

$$\alpha = \frac{1 - \sin \phi_m}{1 + \sin \phi_m} \quad \text{Ec. (6)}$$

$$\alpha = \frac{1 - \sin 30.3^\circ}{1 + \sin 30.3^\circ} = 0.329 \quad \text{Ec. (7)}$$

Una vez que calculamos este valor elegimos una nueva frecuencia de cruce de ganancia el cual se obtuvo con la siguiente formula:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} = \frac{1}{\sqrt{0.329}} = 1.743 \quad \text{Ec. (8)}$$

$$1.743 \text{ dB} \cong 4.83 \text{ rad/s}$$

- El siguiente fue paso fue establecer las nuevas frecuencias de esquina del compensador en adelante quedando de la siguiente manera:

$$\text{Cero } \frac{1}{T} = \sqrt{\alpha} \omega_c = 33787.6 \quad \text{Ec. (9)}$$

$$\text{Polo } \frac{1}{\alpha T} = \frac{\omega_c}{\sqrt{\alpha}} = 109965.76 \quad \text{Ec. (10)}$$

- El siguiente paso fue determinar la ganancia Kc el cual realizamos de la siguiente manera:

$$K_c = \frac{K}{\alpha} = \frac{3.49}{0.329} = 11.39 \quad \text{Ec. (11)}$$

- El último paso es verificar que el margen de ganancia sea satisfactorio, esto lo comprobamos con el diagrama de Bode de la función de transferencia multiplicada por la función de compensador multiplicado por Kc como la dicta la siguiente ecuación.

$$K_c G_c(S)G(s) = (11.39) \left(\frac{s+33787.6}{s+109965.76} \right) \left(\frac{2.1 \left(1 + \frac{s}{6283}\right)}{\left(1 + \frac{s}{5026}\right) \left(1 + \frac{s}{12566}\right) \left(1 + \frac{s}{32044}\right)} \right) \quad \text{Ec. (12)}$$

Una vez obtenida la función de transferencia del sistema compensado se realizó su diagrama de Bode para comprobar el resultado el cual fue el siguiente

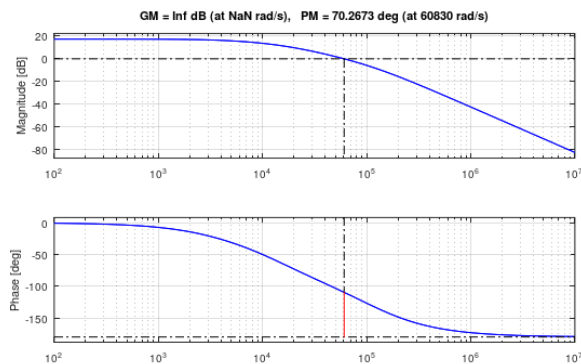


Figura 10. Diagrama de Bode del sistema Compensado.

Como se muestra en la figura 10 el margen de fase corresponde con los 70° que deseábamos obtener, de tal manera se comprobó que el compensador estaba correcto y por lo tanto el sistema también.

Componentes del compensador

$$G_c(s) = K_c \cdot \left(\frac{s + \frac{1}{T}}{s + \frac{1}{\alpha T}} \right) \quad \text{Ec. (13)}$$

$$G_c(s) = \frac{R_4 C_1}{R_3 C_2} \cdot \left(\frac{s + \frac{1}{R_1 C_1}}{s + \frac{1}{R_2 C_2}} \right) \quad \text{Ec. (14)}$$

Como

$$G_c(s) = 11.39 \cdot \frac{s + 33787.6}{s + 109965.76} \quad \text{Ec. (15)}$$

Para obtener los valores de equivalentes de los componentes del circuito para el compensador se propusieron los valores de $C_1 = 1\text{nF}$, $C_2 = 10\text{nF}$ y $R_4 = 100\text{k}\Omega$, por lo que utilizando la ecuación 14 se obtuvieron los siguientes valores

$$\begin{aligned} R_1 &= 29.64 \text{ K}\Omega \\ R_2 &= 909.3 \text{ }\Omega \\ R_3 &= 877.9 \text{ }\Omega \end{aligned}$$

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Previo al análisis de los resultados es importante resaltar los métodos utilizados en el desarrollo de este trabajo y compararlos con otras investigaciones con la finalidad de conocer diferentes puntos de vista y consideraciones que no se tomaron en cuenta en este trabajo, así también como resaltar los hallazgos de esta investigación.

Para la parte del modulador-demodulador AM, al utilizar un circuito basado en un circuito de transistor y diodo

como multiplicador de señales resultó complicado el análisis y modelado matemático de la función de transferencia, por lo que el método experimental fue la opción más óptima de modelar su comportamiento únicamente respecto a la señal moduladora. Sin embargo, el análisis matemático de circuitos con componentes activos ya existe [5].

En el trabajo de Flores et al. [6] utilizan el multiplicador analógico AD633 como modulador. Éste circuito integrado tiene la ventaja de proporcionar en su hoja de datos la función de transferencia respecto a sus entradas. Además, utilizan un oscilador colpitts como generador de la señal portadora, a diferencia de nuestro trabajo que utiliza el DAC de un ESP32 para generar una señal de 500kHz, la cual no es completamente analógica. Esto puede suponer diferentes comportamientos del sistema a comparación de una señal generada por un oscilador analógico.

Por otra parte, existen diferentes formas de diseñar un compensador de adelanto, en este caso se decidió utilizar el criterio del margen de fase al estar trabajando con un análisis en frecuencia. De esta manera se logran ajustar los valores del compensador de acuerdo al margen de fase deseado ampliando el rango de frecuencias que acepta el sistema. Sin embargo, para sistemas con enfoque en la respuesta en el dominio del tiempo existe el método del lugar geométrico de las raíces [7].

Tras el diseño del compensador se procedió a probar el circuito siguiendo el esquemático de la figura 11.

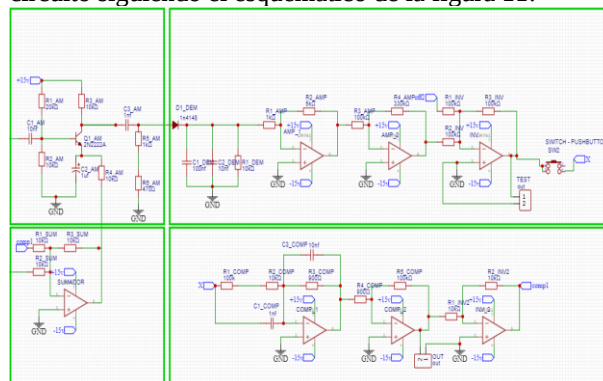


Figura. 11. Circuito con compensador.

El siguiente paso, naturalmente, es la implementación de dicho circuito(compensado) una vez comprobados los tiempos, y valores del compensador, pues estos deben ser igual a los calculados.

Se observa en la figura 12 una amplitud de 7v a la salida, con respecto a la entrada de 6v se determina que el circuito sin compensar tiene una ganancia de 1.3 dB a una frecuencia de 2 kHz, equivalente a 12,566 rad/s. esta respuesta coincide con la gráfica de la figura 7.

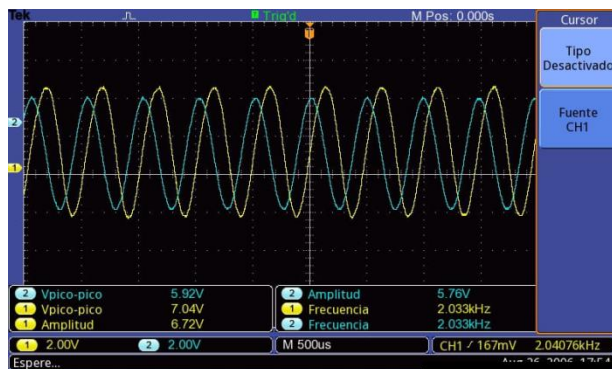


Figura. 12. Señal del circuito con compensadora 2Khz.

La respuesta del circuito con el compensador se muestra en la figura 13. A una frecuencia de 3kHz se tiene una ganancia de 11.7 dB, lo cual coincide con las gráficas calculadas en la parte del compensador.

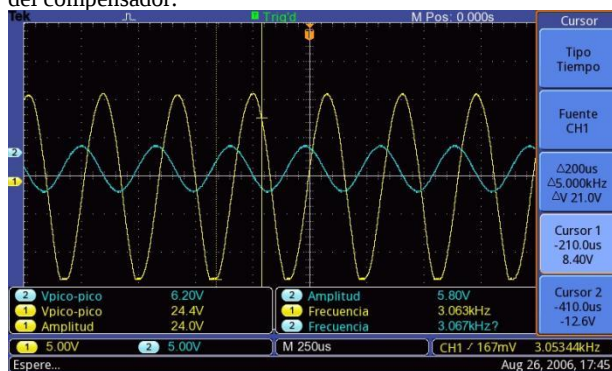


Figura. 13. Señal del circuito con compensadora 3Khz.

Después de comprobar el circuito en la “protoboard” la siguiente acción a seguir era el diseñar una PCB que contuviera el circuito entero, para ello se utilizó el software EasyEDA y el diseño se muestra en la Figura 14.

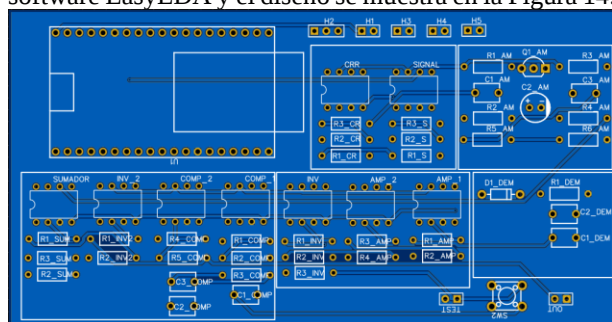


Figura. 14. PCB del circuito con el compensador.

Finalmente, el paso final era soldar los componentes a la PCB y realizar unas últimas pruebas para comprobar que todos los componentes se hubieran colocado correctamente y el circuito junto con el compensador no presentaran variaciones a los resultados obtenidos previamente.



Figura. 15. PCB finalizada.

La amplitud del la señal compensada corresponde a las mostradas en las Fig 12 y 13. en sus respectivas frecuencias, y también se comprobó el ángulo de desfase entre la señal de entrada(el mensaje o señal moduladora) y la señal de salida ya compensada .

El ángulo de fase se comprobó tras obtener la diferencia de tiempo entre las dos señales $T_{12} = 35\mu s$ y con ese dato se aplicó la siguiente ecuación.

$$\phi = T_{12} \cdot f \cdot 360^\circ \quad \text{Ec. (16)}$$

$$\phi \approx 35 \cdot 10^{-6} s \cdot 9500 \text{hz} \cdot 360^\circ \quad \text{Ec. (17)}$$

$$\phi \approx 119^\circ \quad \text{Ec. (18)}$$

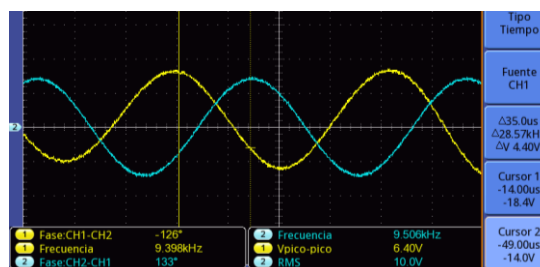


Figura. 16. Desfases entre señales de entrada(amarilla) y salida(azul) a 9.5Khz.

También se comprobó con otra frecuencia, esta vez a 2.3Khz, donde la diferencia de tiempo entre ambas señales es de $T_{12} = 100\mu s$, entonces.

$$\phi = T_{12} \cdot f \cdot 360^\circ \quad \text{Ec. (19)}$$

$$\phi \approx 100 \cdot 10^{-6} s \cdot 2300 \text{hz} \cdot 360^\circ \quad \text{Ec. (20)}$$

$$\phi \approx 83^\circ \quad \text{Ec. (21)}$$

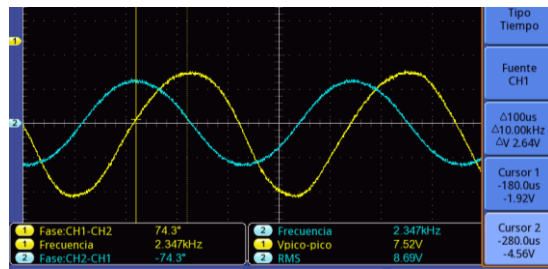


Figura 17. Desfases entre señales de entrada(amarilla) y salida(azul) a 2.3Khz.

Estos desfases y amplitudes corresponden con los resultados obtenidos en matlab mostrados en la Fig. 10.

CONCLUSIONES

En conclusión, este estudio ha explorado la implementación de un compensador diseñado específicamente para mejorar el margen de fase y ganancia de un modulador AM en análisis de frecuencia con diagramas de Bode.

Este enfoque ofrece aplicaciones prácticas significativas en campos como las telecomunicaciones y la electrónica. Por ejemplo, en sistemas de transmisión de datos y voz, la implementación de compensadores puede mejorar la calidad de la señal, reduciendo tiempos de respuesta no deseados y minimizando la distorsión de la señal.

Además, en el ámbito de la ingeniería de comunicaciones, la aplicación de compensadores en moduladores AM contribuye a optimizar la respuesta transitoria de los sistemas de transmisión, mejorando la eficiencia y la confiabilidad de las comunicaciones.

Este estudio no solo proporciona un análisis detallado de la aplicación de compensadores en un contexto específico de modulador AM en análisis de frecuencia, sino que también demuestra la utilidad práctica de estos dispositivos al modificar y mejorar la respuesta de los sistemas de comunicación, con beneficios en diversas áreas de la tecnología y la ingeniería.

Para futuras investigaciones se pretende analizar de manera más detallada el comportamiento del transistor desde un punto de vista matemático para obtener una función de transferencia exacta que permita hacer un ajuste del margen de fase con mayor precisión y compáralo con el método experimental para determinar la magnitud de los errores que este último nos puede dar.

Así mismo, realizar una investigación del multiplicador AD633 en conjunto con un demodulador basado en diodo puede ser una excelente opción para estudiar de manera aislada el comportamiento del demodulador, considerando que el circuito modulador es ideal y no proporciona atenuación ni desfase de las señales.

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] Milocco RH. Diseño de un compensador por adelanto para el control potencia-frecuencia en turbinas hidráulicas de generación eléctrica [Internet]. [Quito]: Escuela Politécnica Nacional; 1989 [citado el 11 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/9557>
- [2] Quintero-Rojas J, CB, Coronel M. Diseño y construcción de un módulo de control analógico tipo adelanto-atraso como herramienta de aprendizaje en la teoría de control [Internet]. Rev Téc Fac Ing Univ Zulía. 2020;43(3):150-8. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=605766264006>
- [3] Franklin GF, Powell JD, Emami-Naeini A. Feedback control of dynamic systems. 8ª ed. Boston: Pearson; 2014.
- [4] Ogata K. Ingeniería de control moderna. 5ª ed. Madrid: Pearson Educación; 2010.
- [5] Baratchart L, Chevillard S, Seyfert F. On transfer functions realizable with active electronic components [Research Report]. INRIA; 2014. Disponible en: <https://inria.hal.science/hal-01098616/>
- [6] Francisco FC. Diseño de un modulador-demodulador AM [Tesis doctoral en Internet]. [México]: Instituto Politécnico Nacional; 2018. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/27651/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [7] Nica EO. Diseño de un controlador PID por análisis del lugar geométrico de las raíces para un sistema de levitación [Internet]. [México]: Instituto Politécnico Nacional; Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/5522/ice13.pdf?sequence=1>
- [8] Diarioelectronicohoy. El amplificador operacional [Internet]. 2002 [citado 2023 Dic 2]. Disponible en: <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/el-amplificador-operacional>
- [9] Kuo BC, Golnaraghi F. Automatic control systems. 10ª ed. Nueva York: McGraw-Hill; 2017.
- [10] Nilsson JW, Riedel SA. Electric circuits. 10ª ed. Boston: Pearson; 2015.
- [11] Boylestad RL, Nashelsky L. Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. Ciudad de México: Pearson Educación; 2003.
- [12] Floyd TL, Salas RN, González LMO, López GP. Principios de circuitos eléctricos. Ciudad de México: Pearson Educación; 2007.
- [13] Floyd TL. Dispositivos electrónicos. Ciudad de México: Limusa; 2002.
- [14] Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad de Zulía. Diseño y construcción de un módulo de control analógico tipo adelanto-atraso como herramienta de aprendizaje en la teoría de control [Internet]. 2020;43(3):150-158. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=605766264006>
- [15] Ornelas F. Control analógico II: Diseño y compensación de sistemas en el dominio de la frecuencia [Internet]. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; [citado 2023 Dic 2]. Disponible en: https://dep.fie.umich.mx/~fornelas/data/uploads/pres_03_dc.pdf
- [16] Alexander CK, Sadiku NO. Fundamentals of electric circuits. 4ª ed. Nueva York: McGraw-Hill; 2008.
- [17] Sedra AS, Smith KC. Microelectronic circuits. 7ª ed. Oxford: Oxford University Press; 2015.
- [18] Dorf RC, Bishop RH. Modern control systems. 13ª ed. Boston: Pearson; 2017.

- [19] Haykin S, Van Veen B. Signals and systems. 2ª ed. Hoboken: John Wiley & Sons; 2007.
- [20] Nise NS. Control systems engineering. 8ª ed. Hoboken: Wiley; 2020.

ROLES DE CONTRIBUCIÓN

Rol	Autores
Conceptualización	Elí Azael López López (Principal) Pablo Moisés Sosa cruz (Colaborador)
Curación de datos	Pablo Moisés Sosa cruz
Metodología	Elí Azael López López (principal) Pablo Moisés Sosa cruz (igual)
Administración del proyecto	Pedro Sanchez Santiago
Recursos	Elí Azael López López (principal) Pablo Moisés Sosa cruz (igual)
Software	Elí Azael López López
Supervisión	Franco Gabriel Caballero Julián
Validación	Franco Gabriel Caballero Julián
Visualización	Pedro Sanchez Santiago
Redacción (Borrador original)	Elí Azael López López (principal) Pablo Moisés Sosa cruz (apoyo)
Redacción (Revisión y edición)	César Hernández Sánchez



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