

Laboratorio 2 - Telecomunicaciones

1st José David Pérez
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Quindío
josed.perezz@uqvirtual.edu.co

2nd Santiago Pérez Oviedo
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Quindío
perez.santiago@uqvirtual.edu.co

3rd Mateo Vargas Claros
Ingeniería Electrónica
Universidad del Quindío
Armenia, Quindío
mateo.vargasc@uqvirtual.edu.co

Abstract—Este informe de laboratorio explora los principios y aspectos prácticos de la modulación de señales de Amplitud (AM) y Frecuencia (FM) utilizando MATLAB. El experimento involucra la generación de señales AM y FM, el análisis de sus características en los dominios del tiempo y la frecuencia, y la evaluación del impacto del Ruido Aditivo Blanco Gaussiano (AWGN) en estas señales moduladas.

Se varían parámetros específicos, como el índice de modulación y la frecuencia de la portadora, para investigar sus efectos. Los hallazgos clave incluyen información sobre el ancho de banda, la potencia y la susceptibilidad al ruido de los esquemas de modulación AM y FM. Este estudio mejora la comprensión de los sistemas de comunicación y las técnicas de modulación de señales.

Index Terms—Modulación de Amplitud (AM), Modulación de Frecuencia (FM), MATLAB, Índice de Modulación, Ruido Aditivo Blanco Gaussiano (AWGN), Ancho de Banda, Potencia de Señal, Sistemas de Comunicación, Análisis de Señales.

I. INTRODUCCIÓN

La modulación de señales es una técnica fundamental en las telecomunicaciones para transmitir información de baja frecuencia en señales de alta frecuencia. En este laboratorio, se exploran dos técnicas de modulación ampliamente utilizadas: Modulación de Amplitud (AM) y Modulación de Frecuencia (FM).

AM implica variar la amplitud de una señal portadora según una señal moduladora, mientras que FM cambia la frecuencia de la portadora. Estas técnicas son esenciales en radios, televisión y comunicaciones.

El objetivo principal es que los estudiantes comprendan estas técnicas y analicen su comportamiento en el dominio del tiempo y la frecuencia. También se evalúa cómo el ruido afecta estas señales utilizando Ruido Aditivo Blanco Gaussiano (AWGN). Se utilizará MATLAB para implementar y analizar estas modulaciones.

Este laboratorio proporciona habilidades prácticas en modulación y permite a los estudiantes entender cómo funcionan en aplicaciones del mundo real. Los resultados y conclusiones de los experimentos se presentarán para

fortalecer la comprensión de estos conceptos.

II. ANÁLISIS Y RESULTADOS

1) *¿Con qué fin se analiza las señales en el dominio de la frecuencia?*: El análisis en el dominio de la frecuencia se realiza para descomponer una señal en sus componentes fundamentales de frecuencia. Esto permite identificar las frecuencias clave presentes en la señal y es esencial para comprender su contenido y aplicaciones en telecomunicaciones, procesamiento de señales y diseño de sistemas.

2) *¿Por qué usa la relación señal a ruido en las señales en dB?*: La razón principal para expresar la relación señal a ruido (SNR) en decibelios (dB) radica en su capacidad para representar de manera más efectiva y fácilmente comprensible las diferencias en niveles de señal y ruido. La escala logarítmica dB permite una medición relativa que se adapta bien a una amplia gama de valores de SNR, desde débiles señales con ruido hasta señales fuertes con poco ruido, haciendo que la evaluación y comparación de SNR sean más intuitivas y útiles en aplicaciones de telecomunicaciones y procesamiento de señales.

3) *¿A qué señal afecta el ruido más a AM ó FM y por qué?*: El ruido tiende a afectar más a la modulación de Amplitud (AM) que a la modulación de Frecuencia (FM) debido a cómo se modulan estas señales. En AM, la información se codifica en la amplitud, que es susceptible al ruido y puede causar distorsión fácilmente. En cambio, en FM, la información se encuentra en las variaciones de frecuencia, lo que hace que la señal sea más robusta ante el ruido, ya que las alteraciones en la amplitud no afectan significativamente la información transmitida. Esto hace que la FM sea menos vulnerable al ruido en comparación con la AM.

A. MODULACIÓN AM

En el laboratorio 2 para la materia sistemas de telecomunicaciones se implementó el sistema de comunicación que se puede observar en la Fig. 1.

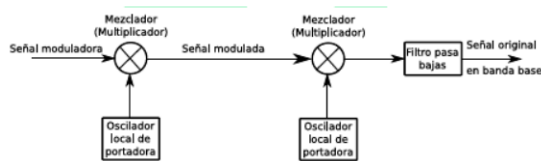


Fig. 1. Sistema de comunicación simplificado

Las frecuencias utilizadas para la portadora y moduladora fueron 500KHz y 10KHz respectivamente.

Para calcular la frecuencia máxima de lado superior (USF) y la frecuencia mínima de lado inferior (LSF) en una señal AM de doble banda lateral, podemos seguir el siguiente proceso:

- En una señal AM, la frecuencia de la portadora (f_c) es el punto central, y la modulación ocurre en torno a esta frecuencia.
- Para calcular la USF, sumamos la frecuencia de la portadora (f_c) y la frecuencia de la señal moduladora (f_m). Esto nos dará la frecuencia máxima a la que llega la señal modulada en el lado superior.
- Para calcular la LSF, sumamos la frecuencia de la portadora (f_c) y la frecuencia de la señal moduladora (f_m). Esto nos dará la frecuencia máxima a la que llega la señal modulada en el lado superior.

$$USF = f_c + f_m \quad (1)$$

- De manera similar, para calcular la LSF, restamos la frecuencia de la señal moduladora (f_m) de la frecuencia de la portadora (f_c). Esto nos dará la frecuencia mínima a la que llega la señal modulada en el lado inferior.

$$LSF = f_c - f_m \quad (2)$$

- Siguiendo este proceso y aplicando tus valores específicos, obtenemos:

$$USF = 500kHz + 10kHz = 510kHz \quad (3)$$

$$LSF = 500kHz - 10kHz = 490kHz \quad (4)$$

Así, hemos calculado la frecuencia máxima de lado superior (USF) y la frecuencia mínima de lado inferior (LSF) de la señal AM con las frecuencias dadas. Estas frecuencias son fundamentales para comprender la distribución de la información en las bandas laterales de una señal modulada en amplitud. En la Fig 2 se pueden observar estas frecuencias.

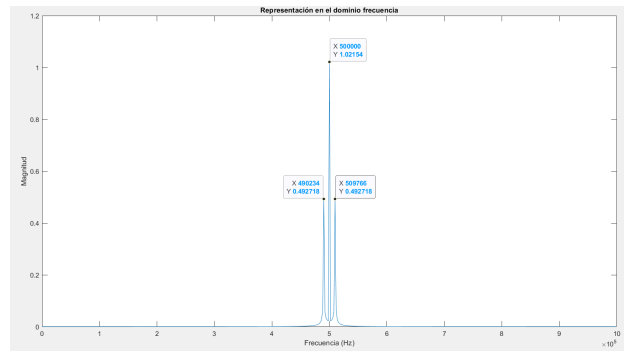


Fig. 2. LSF - USF, Dominio de la frecuencia

Ahora se procedera a generar 4 escenarios dentro del rango del porcentaje de modulación $M = 0\%-120\%$ para cada porcentaje se modifica el voltaje de la señal moduladora (A_m) y la portadora (A_c), luego se analizara el voltaje minimo y maximo, la amplitud maxima de las frecuencias de lado superior e inferior.

Para hallar el indice de modulación se sigue la siguiente formula.

$$m = \frac{E_m}{E_c}$$

E_m = Cambio máximo de amplitud de la señal de salida

E_c = Amplitud máxima de voltaje de la portadora no modulada.

Fig. 3. Índice de modulación

Donde el E_m es el cambio de maxima amplitud lo que seria la resta entre el voltaje maximo y el minimo en la modulación y donde E_c es el pico a pico de la señal portadora Tambien se puede despejar de la siguiente figura.

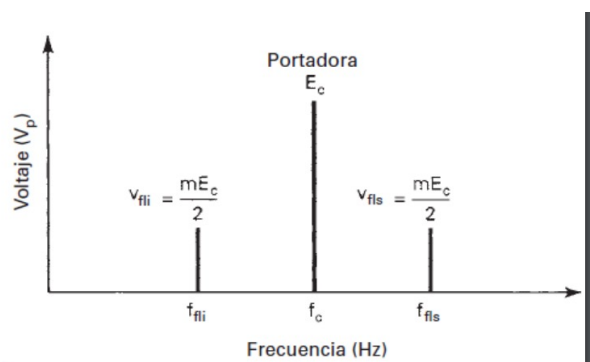


Fig. 4. Índice de modulación desde la frecuencia

Donde V_{fi} y V_{fs} son el voltaje al que llegan estos valores, E_c es la amplitud de la portadora y m el índice de modulación.

1) **Modulación 4%:** Para el porcentaje de modulación del 4% se debe tener en cuenta que:

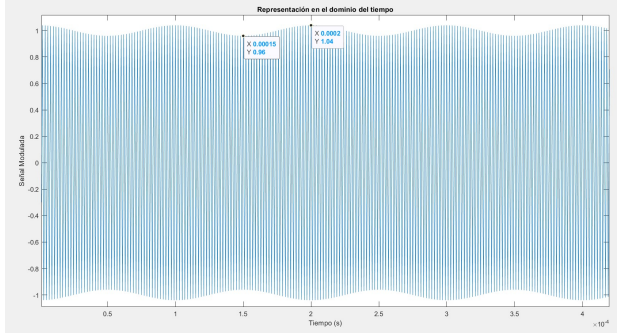


Fig. 5. Índice de modulación al 4%

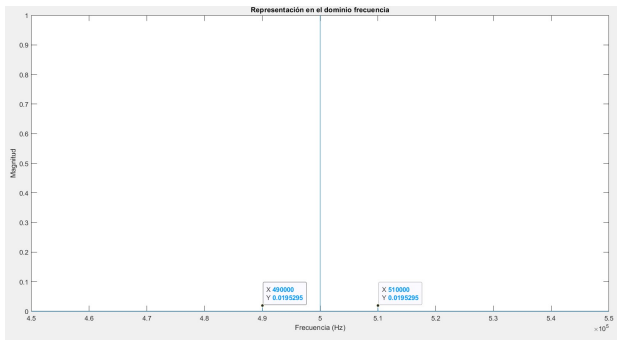


Fig. 6. Amplitud de frecuencias modulación 4%

El voltaje maximo (en el dominio del tiempo) es de 1.04V y el voltaje minimo (en el dominio del tiempo) es de 0.96V.

$$M = \frac{Am}{Ac} \cdot 100 \quad (5)$$

Por ende si $Ac = 1$ y $Am = 0.2$.

$$M = \frac{1.04 - 0.96}{2} \cdot 100 = 4\% \quad (6)$$

Los valores del voltaje maximo y minimo teorico se pueden observar de la siguiente formula.

$$V_{max} = Ac + Am \quad (7)$$

$$V_{max} = Ac - Am \quad (8)$$

En donde Am (amplitud de modulación depende del porcentaje índice de modulación), en este primer caso se mostrara como sacar los valores teoricos.

En este caso al ser porcentaje de modulación del 4% entonces:

$$Am = Am^2 \quad (9)$$

$$Am = 0.2 \cdot 0.2 = 0.04 \quad (10)$$

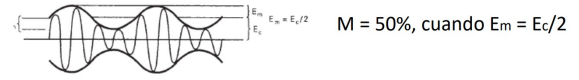


Fig. 7. V_{max} y V_{min}

Ya con estos valores se procede a sacar el voltaje maximo y minimo.

$$V_{max} = 1 + 0.04 = 1.04 \quad (11)$$

$$V_{max} = 1 - 0.04 = 0.96 \quad (12)$$

La amplitud maxima de las frecuencia de lado superior e inferior son las frecuencias de: USB 509961 Hz y LSF 4900039 Hz y su amplitud maxima de 0.01952.

Para sacar el índice de modulación desde el espectro de frecuencia se hace tal que así:

$$V_{USB} = V_{LSF} = 0.01952 \quad (13)$$

$$V_{USB} = \frac{m \cdot Ac}{2} \quad (14)$$

$$m = \frac{V_{USB} \cdot 2}{Ac} \quad (15)$$

$$m = \frac{0.01952 \cdot 2}{1} = 0.03905 \quad (16)$$

$$0.03905 \cdot 100 \approx 4\% \quad (17)$$

2) **Modulación 58%:** Para el porcentaje de modulación del 58% se debe tener en cuenta que:

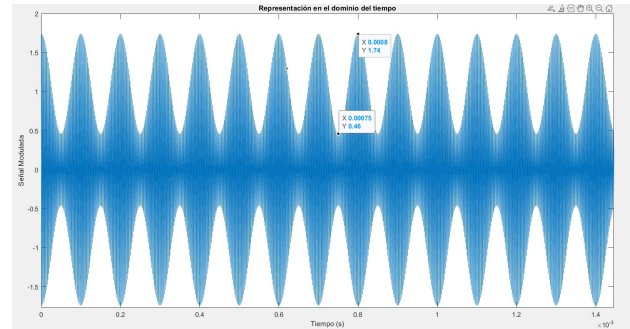


Fig. 8. Índice de modulación al 58%

$$M = \frac{Am}{Ac} \cdot 100 \quad (18)$$

Por ende si $Ac = 1.1$ y $Am = 0.8$.

$$M = \frac{1.74 - 0.46}{2.2} \cdot 100 = 58\% \quad (19)$$

El voltaje maximo (en el dominio del tiempo) es de 1.74V y el voltaje minimo (en el dominio del tiempo) es de 0.46V.

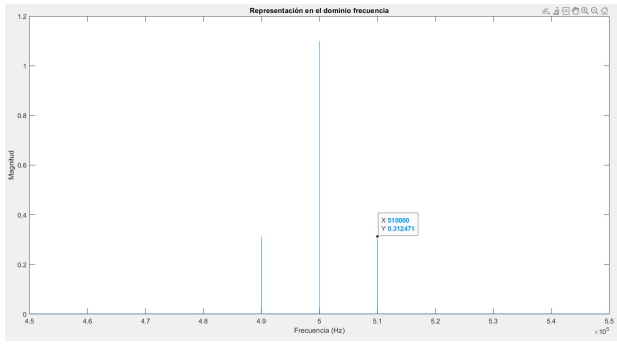


Fig. 9. Amplitud de frecuencias modulacion 58%

$$Am = Am^2 \quad (20)$$

$$Am = 0.8 * 0.8 = 0.64 \quad (21)$$

Ya con estos valores se procede a sacar el voltaje maximo y minimo.

$$V_{max} = 1.1 + 0.64 = 1.74 \quad (22)$$

$$V_{max} = 1.1 - 0.64 = 0.46 \quad (23)$$

La amplitud maxima de las frecuencia de lado superior e inferior son las frecuencias de: USB 510000 Hz y LSF 490000 Hz y su amplitud maxima de 0.0312471.

Para sacar el índice de modulación desde el espectro de frecuencia se hace tal que así:

$$V_{USB} = V_{LSF} = 0.0312471 \quad (24)$$

$$m = \frac{V_{USB} * 2}{Ac} \quad (25)$$

$$m = \frac{0.0312471 * 2}{1.1} = 0.05681 \quad (26)$$

$$0.05681 * 100 \approx 57\% \quad (27)$$

3) **Modulación 98%:** Para el porcentaje de modulación del 98% se debe tener en cuenta que:

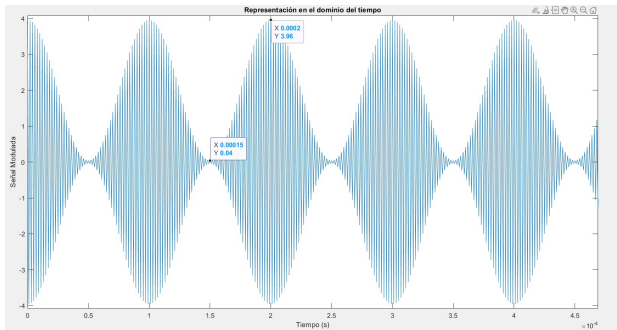


Fig. 10. Indice de modulación al 98%

$$M = \frac{Am}{Ac} \cdot 100 \quad (28)$$

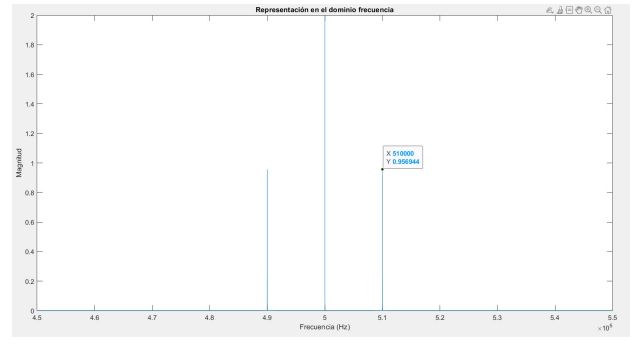


Fig. 11. Amplitud de frecuencias modulacion 98%

Por ende si $Ac = 2$ y $Am = 1.4$.

$$M = \frac{3.96 - 0.04}{4} \cdot 100 = 98\% \quad (29)$$

El voltaje maximo (en el dominio del tiempo) es de 3.96V y el voltaje minimo (en el dominio del tiempo) es de 0.04V.

$$Am = Am^2 \quad (30)$$

$$Am = 1.4 * 1.4 = 1.96 \quad (31)$$

Ya con estos valores se procede a sacar el voltaje maximo y minimo.

$$V_{max} = 2 + 1.96 = 3.96 \quad (32)$$

$$V_{max} = 2 - 1.96 = 0.04 \quad (33)$$

La amplitud maxima de las frecuencia de lado superior e inferior son las frecuencias de: USB 510000 Hz y LSF 490000 Hz y su amplitud maxima de 0.956944

$$V_{USB} = V_{LSF} = 0.956944 \quad (34)$$

$$m = \frac{V_{USB} * 2}{Ac} \quad (35)$$

$$m = \frac{0.956944 * 2}{2} = 0.9569 \quad (36)$$

$$0.9569 * 100 \approx 95\% \quad (37)$$

4) **Modulación 115%:** Para el porcentaje de modulación del 119% se debe tener en cuenta que:

$$M = \frac{Am}{Ac} \cdot 100 \quad (38)$$

Por ende si $Ac = 1.7$ y $Am = 1.4$.

$$M = \frac{3.66 - (-0.26)}{3.66 + (-0.26)} \cdot 100 = 115\% \quad (39)$$

El voltaje maximo (en el dominio del tiempo) es de 3.66V y el voltaje minimo (en el dominio del tiempo) es de -0.26V.

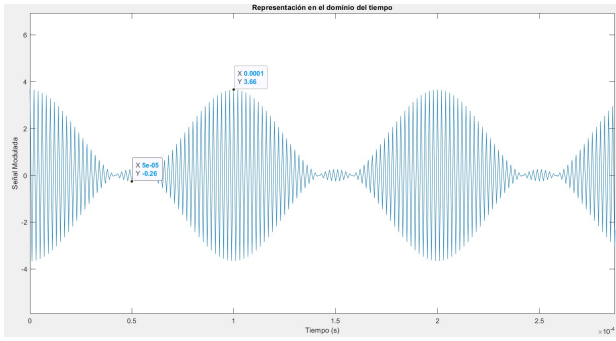


Fig. 12. Índice de modulación al 115%

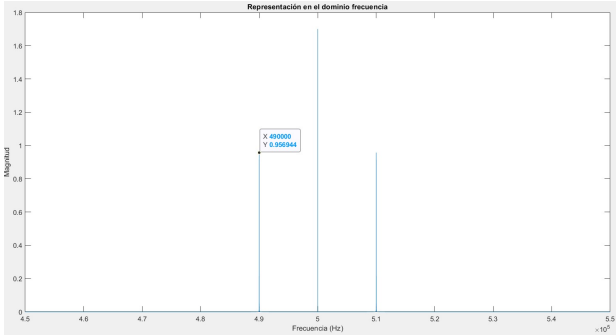


Fig. 13. Amplitud de frecuencias modulación 115%

$$Am = 1.4^2 \quad (40)$$

$$Am = 1.4 * 1.4 = 1.96 \quad (41)$$

Ya con estos valores se procede a sacar el voltaje maximo y minimo.

$$V_{max} = 1.7 - 1.96 = -0.26 \quad (42)$$

La amplitud maxima de las frecuencia de lado superior e inferior son las frecuencias de: USB 509961 Hz y LSF 490039 Hz y su amplitud maxima de 0.9569, como supera mas de la mitad de la amplitud de la portadora se puede saber que hay sobre modulación.

B. MODULACIÓN FM

La modulación FM y PM genera ondas de salida indistinguibles, lo único que cambia es el índice de modulación ya que cuando se cambia la frecuencia en FM cambia el índice de modulación por el contrario en PM no cambia el índice de modulación.

Para el segundo punto se asumira un modulador FM con diferentes valores de índice de modulación, para ello se utilizara 5 valores distintos de índice de modulación y se analizará el ancho de banda de Carlson y la potencia.

Para tener el ancho de banda de Carson es necesario conocer la desviación maxima Δf para ello se puede despejar

de la siguiente formula, donde mf es el índice de modulación FM y fm es la frecuencia de la moduladora .

$$\Delta f = mf * fm \quad (43)$$

Después para hallar el ancho de banda de Carson se utiliza la siguiente formula.

$$\Delta Bc = 2 * (\Delta f + fm) \quad (44)$$

Se analizará con un índice de modulación de frecuencia de 5, 10, 15, 25 y 50.

1) **Índice de modulación de frecuencia de 5:** Con un índice de modulación de 5 se puede obtener la desviación máxima.

$$\Delta f = 5 * 100k = 500k \quad (45)$$

El ancho de banda de Carson es de:

$$Bc = 2 * (500k + 100k) = 1.2Mhz \quad (46)$$

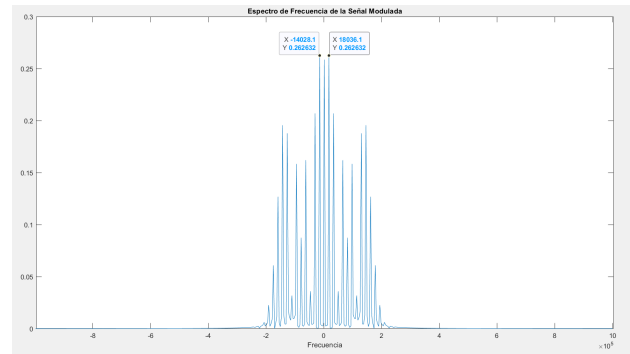


Fig. 14. Espectro de frecuencia - Índice de modulación de 5

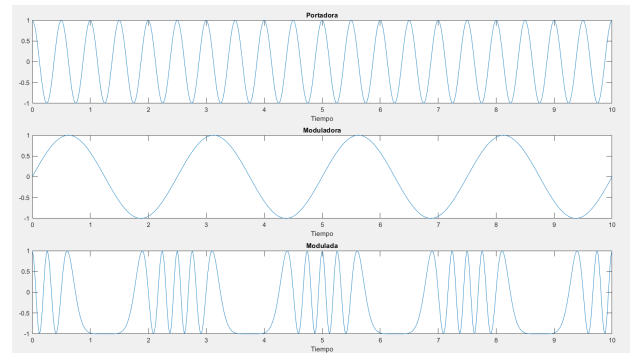


Fig. 15. Modulación - Índice de modulación de 5

2) **Índice de modulación de frecuencia de 10:** Con un índice de modulación de 10 se puede obtener la desviación máxima.

$$\Delta f = 10 * 100kHz = 1M \quad (47)$$

El ancho de banda de Carson es de:

$$B_c = 2 * (1M + 100kHz) = 2.2Mhz \quad (48)$$

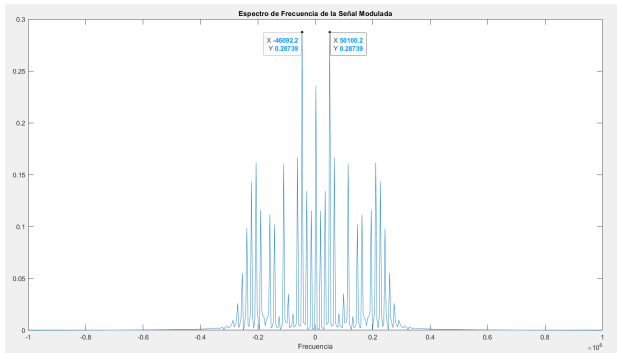


Fig. 16. Espectro de frecuencia - Índice de modulación de 10

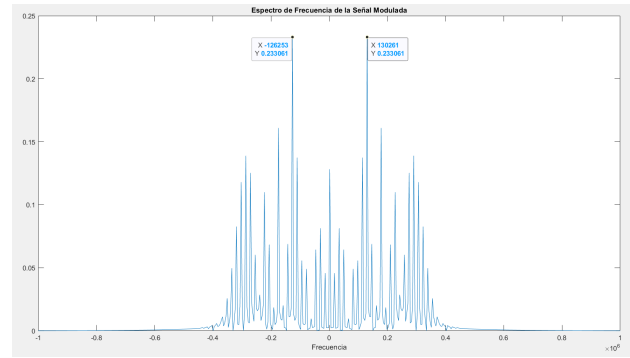


Fig. 18. Espectro de frecuencia - Índice de modulación de 15

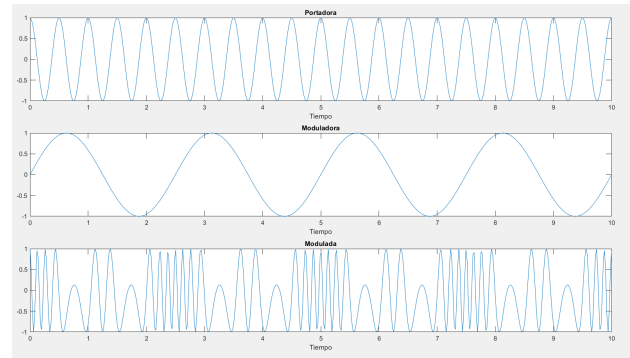


Fig. 19. Modulación - Índice de modulación de 15

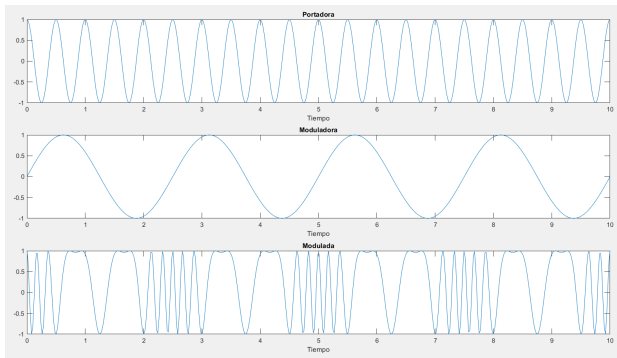


Fig. 17. Modulación - Índice de modulación de 10

3) **Índice de modulación de frecuencia de 15:** Con un índice de modulación de 15 se puede obtener la desviación máxima.

$$\Delta f = 15 * 100kHz = 1.5Mhz \quad (49)$$

El ancho de banda de Carson es de:

$$B_c = 2 * (1.5M + 100kHz) = 3.2Mhz \quad (50)$$

4) **Índice de modulación de frecuencia de 25:** Con un índice de modulación de 25 se puede obtener la desviación máxima.

$$\Delta f = 25 * 100kHz = 2.5Mhz \quad (51)$$

El ancho de banda de Carson es de:

$$B_c = 2 * (2.5M + 100kHz) = 5.2Mhz \quad (52)$$

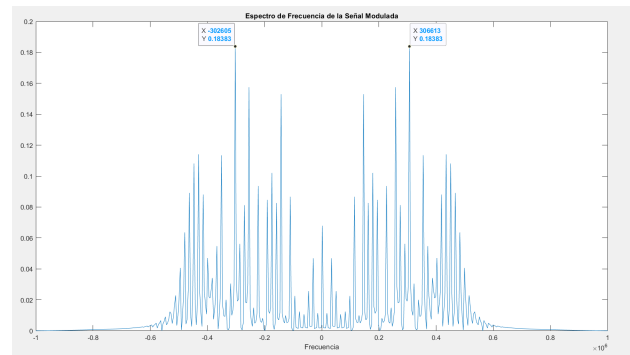


Fig. 20. Espectro de frecuencia - Índice de modulación de 25

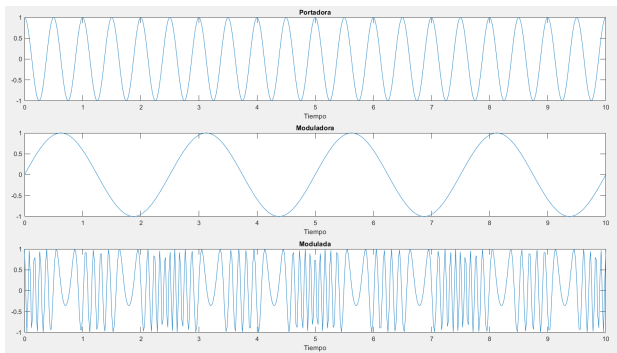


Fig. 21. Modulación - Índice de modulación de 25

5) **Índice de modulación de frecuencia de 50:** Con un índice de modulación de 25 se puede obtener la desviación máxima.

$$\Delta f = 50 * 100kHz = 5Mhz \quad (53)$$

El ancho de banda de Carson es de:

$$Bc = 2 * (5M + 100kHz) = 10.2Mhz \quad (54)$$

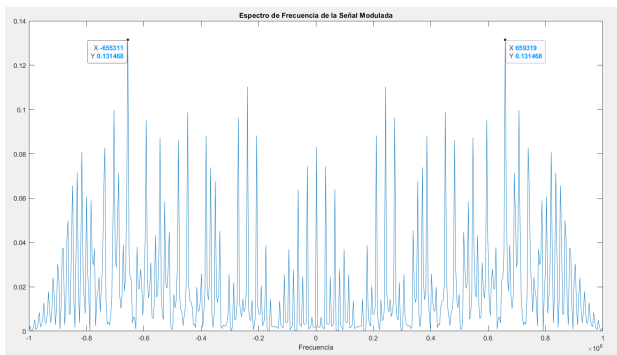


Fig. 22. Espectro de frecuencia - Índice de modulación de 50

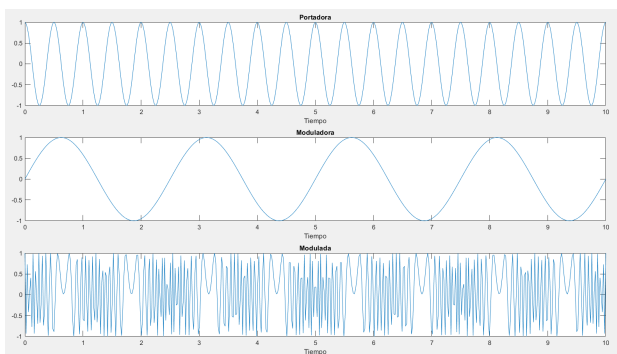


Fig. 23. Modulación - Índice de modulación de 50

C. MODULACIÓN AM CON RUIDO

Para este punto se utilizó el script de MATLAB en el cual se le adiciona ruido a una señal modulada. Para ello, se

hará un cambio en la amplitud de la señal modulada y un cambio en la amplitud de la señal portadora para así ver una modificación en la amplitud de la señal modulada.

Primero se mirará con un porcentaje de modulación del 80%, para ello se utilizará una amplitud de portadora "A" de 1 y una amplitud de moduladora "Am" de 0.8, por ende, el índice de modulación es del 58% ya que fue calculado previamente.

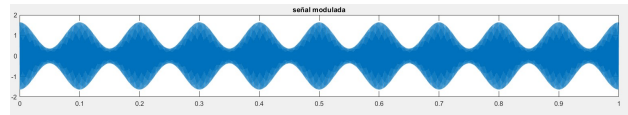


Fig. 24. Porcentaje de modulación 58%

Se plantea una amplitud de 1 de ruido.

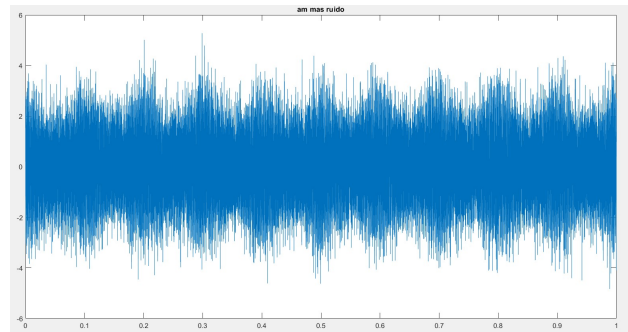


Fig. 25. Porcentaje de modulación 58% con amplitud del ruido de 1

Se puede notar un gran problema ya que hay demasiado ruido, y se puede comprobar en la figura 26 donde se puede observar a la señal demodulada.

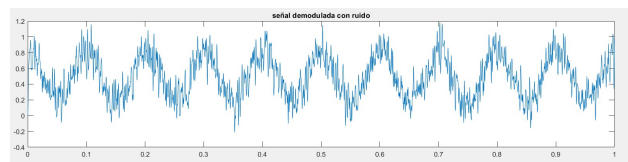


Fig. 26. Señal demodulada con un porcentaje de modulación 58%

Entonces se hace una variación disminuyendo la amplitud del ruido a 0.1, con el mismo porcentaje de modulación quedando tal que así:

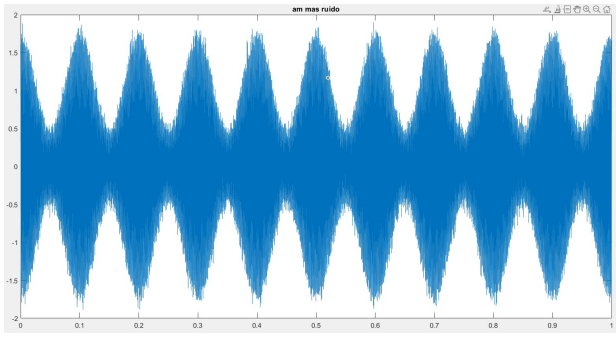


Fig. 27. Porcentaje de modulación 58% con amplitud del ruido de 0.1

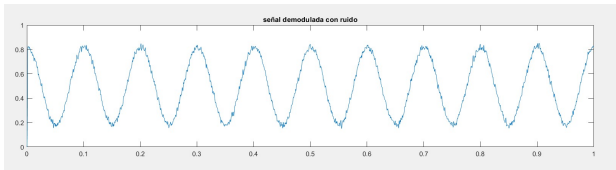


Fig. 28. Señal demodulada con un porcentaje de modulación 58% y una amplitud de ruido de 0.1

Ahora si se puede notar la señal modulada en la figura 27 y su correspondiente demodulación en la figura 26, se puede observar y suponer que no hay tanto problema, ya que realmente el ruido es una décima parte de la señal portadora, pero si llega a haber una amplitud muy pequeña de la moduladora, es un gran problema, ya que para que haya modulación AM se debería también disminuir la portadora y, por ende, la relación señal a ruido baja, lo que provoca que el ruido se meta mucho en la señal.

D. MODULACIÓN FM CON RUIDO

Para este punto se utilizó el script de MATLAB en el cual se le adiciona ruido a una señal modulada, en este caso para adicionar ruido a una señal FM.

En el primer caso se analizará con un ruido con amplitud igual a la amplitud de la portadora. Además, para este caso, la frecuencia de la moduladora es de 100 Hz, la frecuencia de la portadora es 10 veces la frecuencia de la moduladora y, además, la amplitud de la señal de la moduladora y de la portadora es de 5.

Se utilizara una modulación de frecuencia de 5.

Con estos valores se puede despejar la desviación.

$$\Delta f = 5 * 100 = 500Hz \quad (55)$$

Con esto en cuenta se puede obtener el ancho de banda de Carson, el ancho de banda de Carson es de:

$$Bc = 2 * (500 + 100) = 1.2kHz \quad (56)$$

Ya con esto se corre el código y en las siguientes figuras se observara como da la señal modulada.

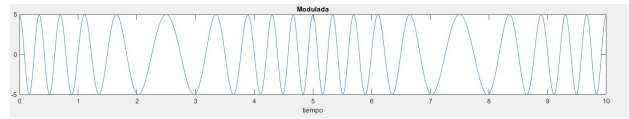


Fig. 29. Señal con fm índice de modulación de 5 sin ruido

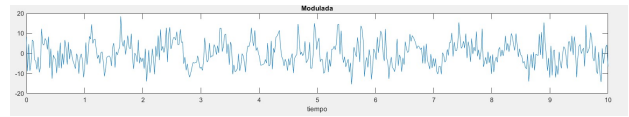


Fig. 30. Señal con fm índice de modulación de 5 con ruido de 5 de amplitud

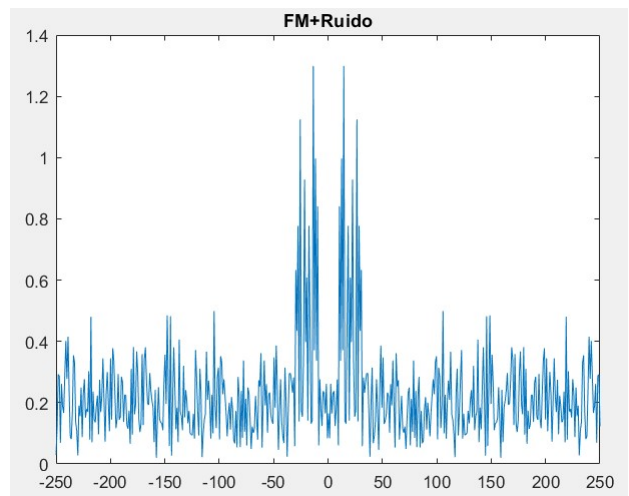


Fig. 31. Fm mas ruido con amplitud de 5

Se puede observar en la figura ?? tiene un gran ruido por eso se analizara con una amplitud de ruido menor. Se utilizara el mismo índice de modulación pero con una amplitud de ruido de 10 veces menor (0.5).

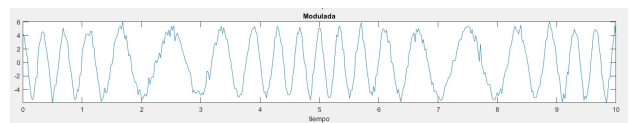


Fig. 32. Señal con fm índice de modulación de 5 con ruido de 0.5 de amplitud

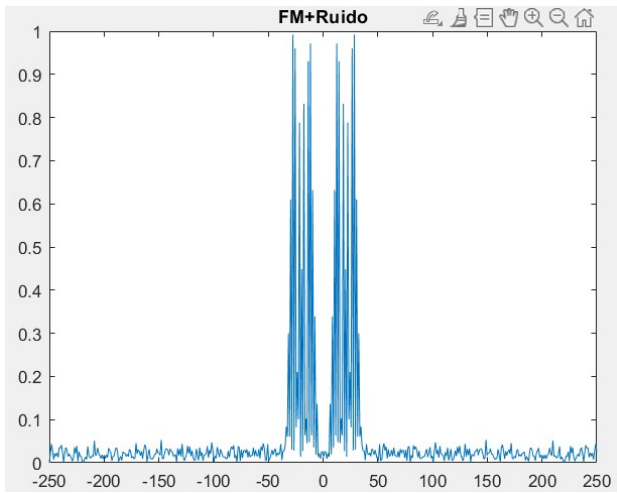


Fig. 33. Fm mas ruido con amplitud de 0.5 e índice de modulación de frecuencia de 5

Se puede observar una mejora significativa, y entre mayor sea la SNR (Relación señal a ruido) mejor sera la señal modulada.

Se hara lo mismo pero con un índice de modulación de 50, por ello cambia la desviación maxima.

$$\Delta f = 50 * 100 = 5000Hz \quad (57)$$

Con esto en cuenta se puede obtener el ancho de banda de Carson, el ancho de banda de Carson es de:

$$Bc = 2 * (5000 + 100) = 10200hz \quad (58)$$

Primero se analizara con una amplitud de ruido de 5, siendo igual a la amplitud de la portadora y la moduladora.

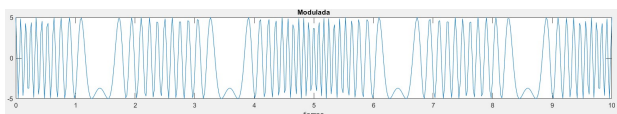


Fig. 34. Señal con fm índice de modulación de 50 sin ruido

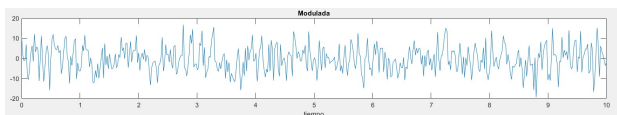


Fig. 35. Señal con fm índice de modulación de 50 con ruido de 5 de amplitud

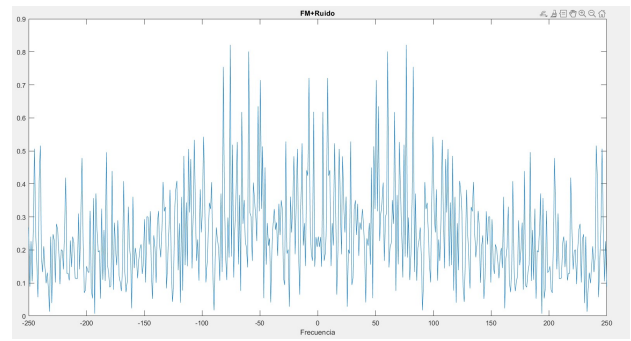


Fig. 36. Fm mas ruido con amplitud de 5 e índice de frecuencia de 50

Y por último se bajara la amplitud del ruido a una decima parte (0.5).

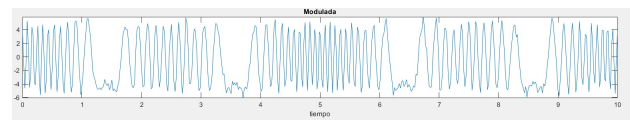


Fig. 37. Señal con fm índice de modulación de 50 con ruido de 0.5 de amplitud

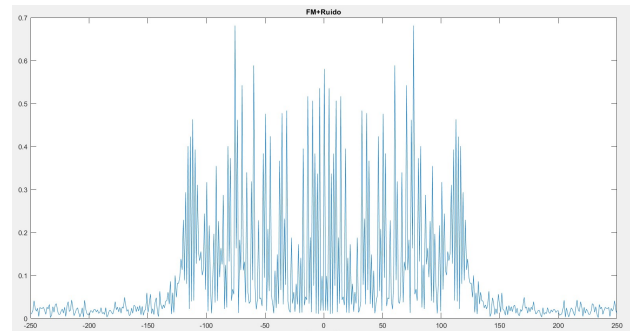


Fig. 38. Fm mas ruido con amplitud de 0.5 e índice de frecuencia de 50

III. CONCLUSIONES

Observando la figura 33 y observando la figura 38 se puede observar que en ambas la amplitud del ruido es de 0.5 pero tienen distintos índices de modulación el de la figura 33 siendo de 5 y el de la figura 38 siendo de 50, se puede notar un mayor ruido en la figura con el índice de modulación mas alto ya que si el índice de modulación es alto, el ancho de banda de la señal modulada es mayor y la relación señal-ruido puede llegar a ser mas baja.

Se concluye tambien que la modulación Am es mas susceptible al ruido, ya que se puede observar el ruido siendo 10 veces mas bajo que la amplitud de la portadora se puede seguir observando mucho ruido, por el contrario en la modulación Fm siendo el ruido 10 veces menor que la amplitud de la portadora se puede observar una señal modulada bastante buena, esto debido a que la información se transmite a través de la variación de la frecuencia de la señal portadora, por ende, la señal modulada es menos susceptible al ruido.

Si llega a haber un porcentaje de modulación A_m mayor al 100% se presenta una sobremodulación de la señal, por ello la amplitud de la señal modulada no puede superar a la amplitud de la señal portadora.

IV. REFERENCIAS

- [1] Rohde Schwarz. (1 septiembre 2022). *Entendiendo la Modulación de Amplitud*. <https://www.youtube.com/watch?v=EawVwpi89Do>
- [2] W. Tomasi. *SISTEMA DE COMUNICACIONES ELECTRÓNICAS*. 4 edición. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México. pearson educación. (2003).
- [3] Electronica FP. (6 febrero 2019). *A.M. (3.- Índice de modulación)* <https://www.youtube.com/watch?v=2kbqY7OhbQQ>