



Práctica 3: MODULACIONES LINEALES

CAMILA ANDREA BELEÑO CABRALES - 2204280
NICOLAS CHAPARRO - 2201605

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander

17 de noviembre de 2023

Resumen

Esta práctica hace énfasis en el estudio de las modulaciones lineales AM y SSB, teniendo como objetivo que los estudiantes aprendan a generar, analizar cada uno de los parámetros, identificar propiedades espectrales, índice de modulación y eficiencia espectral; dejando a su vez en concepto de técnicas de modulación. Esta práctica es muy importante para cada uno de los estudiantes puesto que profundiza conocimientos para así comprender de una mejor manera las modulaciones lineales y su importancia.

Palabras clave: Modulaciones lineales, AM (Modulación en amplitud), SSB (Banda lateral única), Espectro.

1. Introducción

- Históricamente, la modulación de amplitud (AM) ha sido importante en la transmisión de señales de radio debido a su capacidad para transmitir información de audio a largas distancias. Fue muy utilizado en la primera mitad del siglo XX para transmisiones de radio. Las modulaciones AM permiten variar la amplitud de la señal de modulación según la señal de audio original, facilitando la transmisión de sonido y música por ondas de radio, llegando a grandes audiencias y promoviendo el desarrollo de las comunicaciones a larga distancia.
- Modular en amplitud tiene varias ventajas: 1) Fácil implementación: En la práctica se pudo notar que las modulaciones AM son relativamente sencillas de trabajar y comprender ya que se utilizaron pocos equipos y componentes. 2) Menos interferencia: En el laboratorio se logró observar que la señal maneja por lo general buena calidad y es menos susceptible a las interferencias, todo esto gracias a que toda su información se encuentra en su amplitud. 3) Eficiencia energética: Para detectar esta ventaja, en la práctica se notó que para transmitir señales AM, la portadora no se modifica lo cual permite que tenga un uso más eficiente en cuestión de la energía que es transmitida.
- El índice de modulación (μ) representa la relación que hay entre la amplitud de la portadora y la amplitud de la señal de la portadora. Este índice de modulación se puede medir en el osciloscopio con el máximo de la señal modulante dividido entre en la amplitud de la portadora, cabe resaltar que este parámetro es muy importante ya que permite determinar la cantidad de información a transmitir, además de la calidad, este parámetro indica si la señal está sobremodulada ($\mu > 1$), dejando a su vez también definido la eficiencia espectral que la señal está teniendo ya que un μ muy bajo indica una menor eficiencia.
- Es importante resaltar que para observar estas señales moduladas linealmente en el osciloscopio se debe tener en cuenta: 1) Ancho de banda: Este debe ser lo necesariamente alto para mostrar las variaciones de la amplitud que proporciona la señal modulada. 2) Tiempo de muestreo: Esta consideración es muy esencial e importante ya que, un tiempo de muestreo más rápido estaría indicando una mejor representación y detalle a profundidad de la señal modulada. 3) Ajuste de la escala vertical: El ajuste preciso de esta escala vertical permite observar claramente la amplitud de la señal modulada, con esta condición se busca que la señal se muestre de tal forma que no haya distorsiones o cortes.
- Los parámetros para obtener/medir las señales moduladas en el dominio del tiempo se pueden clasificar en: 1) Amplitud: Este vendría siendo el valor máximo de la señal modulada el cual también vendría siendo la amplitud de la portadora. 2) Frecuencia: Este parámetro hace referencia a la fre-



cuencia de la señal modulada y en las modulaciones lineales se mantiene constante conservando la amplitud de la portadora. 3) Índice de modulación: Este representa la cantidad de modulación en la portadora. También es necesario resaltar que en el dominio de la frecuencia se puede obtener/medir las señales moduladas con otros parámetros como: 1) Espectro en frecuencia: Aquí se puede obtener la gráfica de la amplitud y la distribución de las componentes frecuenciales de la señal modulada. 2) Ancho de banda: El ancho de banda ocupado lo define el rango que tiene la mayor parte de la señal modulada.

- Para observar las señales moduladas linealmente en el analizador de espectros se debe tener algunas consideraciones mínimas, las cuales serían: 1) Ancho de banda del analizador: Este parámetro debe ser lo suficientemente amplio para poder obtener todas las componentes de frecuencia de la señal modulada para que así no se presencie ninguna perdida de información. 2) Resolución de frecuencia: Aquí es muy importante asegurarse de tener una adecuada resolución para así lograr visualizar con exactitud las componentes frecuenciales de la señal modulada. 3) Escala de amplitud: Este parámetro debe ajustarse a una escala apropiada para así asegurar que la señal modulada no quede por fuera del rango establecido y que a su vez permita una correcta visualización para el análisis de la misma.

2. Procedimiento

- Para medir el índice de modulación experimentalmente en el analizador de espectro se debe primero realizar el montaje, teniendo en cuenta que debemos tener un mensaje y una portadora en la que modular nuestro mensaje, estos dos componentes los definimos en GNU radio que es el software elegido para estas prácticas, después de definir las fuentes de cada señal, se realiza el diagrama de bloques correspondiente a la modulación en amplitud. Para facilitar el análisis se usan señales sinusoidales como portadora y como mensajes, después de haber realizado el diagrama de bloques, se conecta el circuito que va desde el radio hasta el analizador de espectro, ya con esto se corre el programa y se puede observar el espectro del mensaje enviado y de la portadora como se ve en la siguiente imagen:

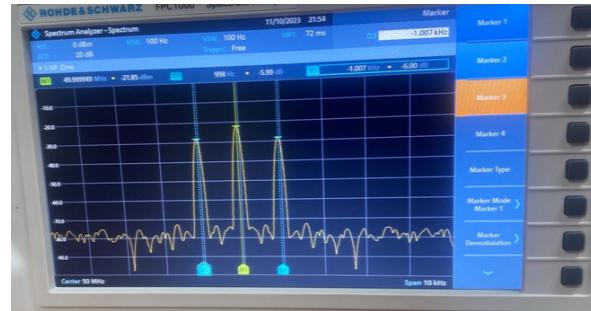


Figura 1: modulación AM, $m=1$.

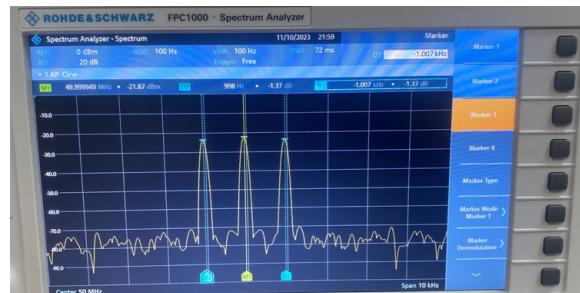


Figura 2: modulación AM, $m>1$.

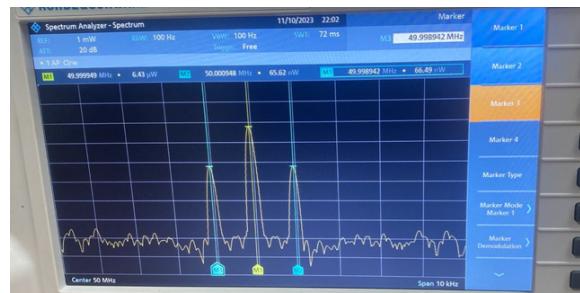


Figura 3: modulación AM, $m<1$.

Al tener la respuesta en frecuencia de la señal del mensaje y la portadora, se puede calcular el índice de modulación teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$Ndb = 20 \log_{10}(m/2)$$

Donde m es el índice de modulación y Ndb es la diferencia que existe entre la amplitud de la respuesta en frecuencia de la portadora y la amplitud de la respuesta en frecuencia del mensaje.

Esta diferencia se puede calcular fácilmente con ayuda del analizador de espectro usando la opción de marcadores en modo diferenciales. Al tener ya el valor de Ndb se procede a despejar el índice de modulación que quedaría de la siguiente manera:

$$m = 20^{Ndb/20}$$



Al calcularlo, podemos clasificar si la señal está sobre modulada o modulada normalmente, si el valor del índice de modulación es mayor a uno se dice que la señal está sobre modulada, si este valor es menor a uno está simplemente modulada.

- Para calcular el índice de modulación experimentalmente en el osciloscopio es un proceso similar al de calcularlo con el analizador de espectro, se realiza el mismo montaje, pero esta vez la salida va en un canal del osciloscopio, luego de tener la conexión realizada y empezar a transmitir el programa en GNU radio configuramos el tiempo análisis del osciloscopio de tal manera que se pueda observar la modulación de la señal en el tiempo de la siguiente manera:

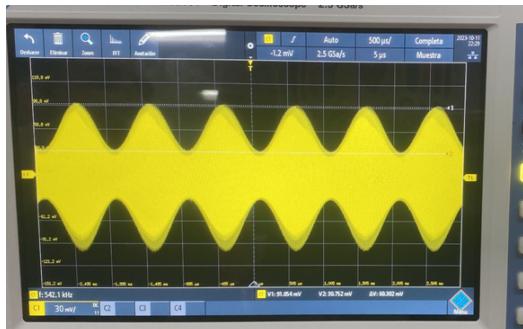


Figura 4: modulación AM, $m < 1$.

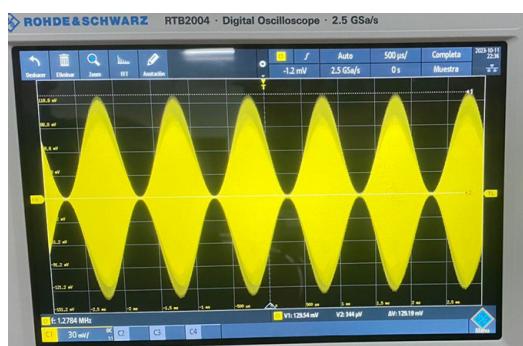


Figura 5: modulación AM, $m = 1$.

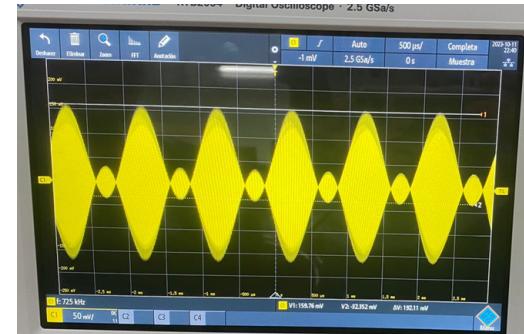


Figura 6: modulación AM, $m > 1$.

Al observar la señal, para obtener el índice de modulación se debe medir el punto máximo de amplitud de la envolvente y el punto mínimo, de esta manera se encuentra dos veces la amplitud del mensaje que se transmite ya que la envolvente toma la forma del mensaje que se está transmitiendo, con esto se puede dividir este valor sobre dos y se obtiene el valor de la amplitud del mensaje, con la amplitud del mensaje se puede aplicar la siguiente ecuación para obtener el índice de modulación de señales AM:

$$m = K_a * A_m , m = A_m / A_c$$

Donde K_a es el coeficiente de sensibilidad de amplitud, A_m es la amplitud del mensaje, A_c es la amplitud de la señal portadora.

Se puede observar que en el tiempo se pueden diferenciar las modulaciones normales y cuando ocurre una sobre modulación, cuando la señal es modulada normalmente se puede observar claramente que la envolvente de la modulación toma la forma sinusoidal del mensaje, pero cuando se sobre modula, se pierde parte de la información, ya que se pasa a una parte negativa en amplitud y se toma el valor absoluto de la señal.

- El índice de modulación puede ser encontrado en análisis en el tiempo con ayuda del osciloscopio o en frecuencia con el analizador de espectros como ya se vio en los dos incisos anteriores, el índice de modulación en el tiempo se puede encontrar como:

$$m = K_a * A_m$$

$$m = A_m / A_c$$

Podemos calcular la eficiencia de la modulación teniendo las potencias de las señales de la siguiente manera:



$$n = Pt - P_c/P_t$$

Al variar K_a podemos observar los siguientes resultados:

Ac	Ka	Am	Pt[dBm]	Pc[dBm]
1	0.2	1	-21.2	-21.2
1	1	1	-20.15	-21.2
1	1.7	1	-17.166	-21.2

Figura 7: tabla modulación AM.

Con esta tabla se puede observar que el coeficiente de sensibilidad K_a afecta de manera directa el índice de modulación, esto se esperaba ya que con las ecuaciones teóricas para encontrar el índice de modulación el índice de modulación tiene una relación proporcional con este coeficiente de sensibilidad, también se observa que hay una relación proporcional con la amplitud del mensaje y un relación de proporcionalidad inversa con la amplitud de la portadora.

- La modulación SSB es una forma de modulación en amplitud en la que se suprime la portadora y una banda lateral, su principal ventaja es que al reducir los términos que se transmiten se reduce también el ancho de banda, haciendo de esta transmisión más eficiente que la AM en términos de aprovechamiento de ancho de banda. Esta también presenta algunas limitaciones, por ejemplo que para poder transmitir se requiere equipos más sofisticados y costosos en comparación con AM tradicional, otra de las problemáticas es que la recuperación de las señales transmitidas se hace más compleja al no tener la portadora ni una de las bandas laterales[1][2]. En la siguiente imagen podemos ver un ejemplo claro de una modulación SSB, esta modulación tiene múltiples variantes como SSB-SC, en la que se suprime la portadora, SSB-FC single side band full carrier, en la que se tiene la portadora, también se puede elegir si se suprime la banda lateral superior o inferior:



Figura 8: SSB-FC banda inferior suprimida.

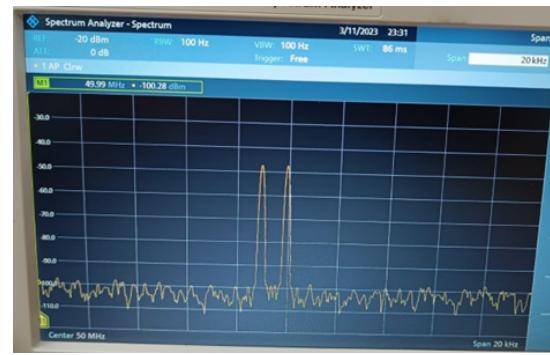


Figura 9: SSB-FC banda superior suprimida.

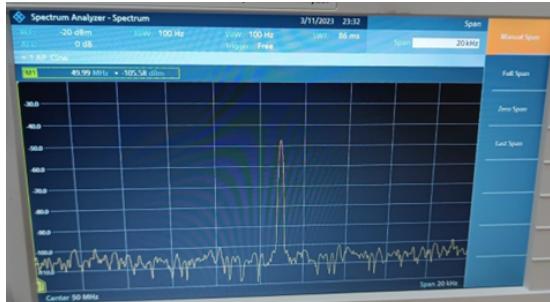


Figura 10: SSB-SC banda inferior suprimida.

- Cuando se manipulan audio como señales fuentes para este tipo de ejercicios de modulaciones, el análisis cambia ya que las señales de audio cambian con respecto al tiempo por tanto no es tan fácil calcular el índice de modulación pero es posible, una forma de hacerlo es experimentalmente variando el coeficiente de modulación, se pueden percibir variaciones en el sonido cuando la señal se modula y al observar la señal en el osciloscopio se puede observar cuando la señal empieza a pasar al cuadrante negativo indicando que se está sobremodulando.

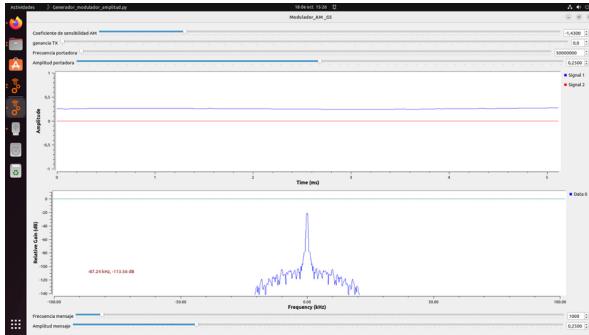


Figura 11: Señal de audio modulada.

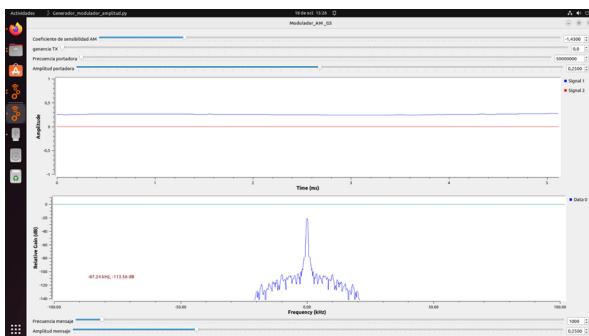


Figura 12: Señal de audio sobre-modulada.

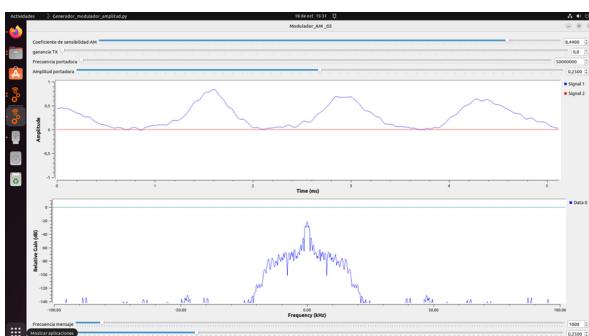


Figura 13: Señal de audio modulada al 1.

- Analizando la señal en el analizador de frecuencia podemos escuchar la señal modulada activando la opción de demulador AM. al variar el coeficiente de sensibilidad se puede percibir que el audio se satura y se distorsiona hasta que no se entiende muy bien lo que dice el audio.

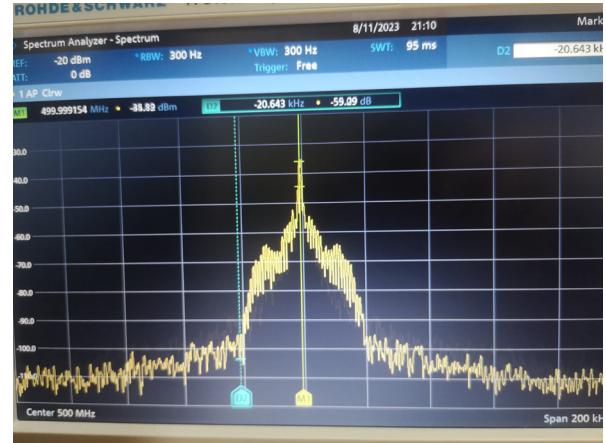


Figura 14: Señal de audio en el analizador de frecuencia.

■ La transmisión de la portadora en las modulaciones lineales es crucial para facilitar la recuperación de la señal original en el receptor. La portadora contiene información sobre la frecuencia central y sirve como referencia de tiempo para la sincronización. Además, permite una transmisión más eficiente en términos espectrales al concentrar la energía de la señal en una banda de frecuencia más estrecha. La presencia de la portadora también ofrece ventajas como el rechazo de frecuencia, contribuyendo así a la calidad y eficacia de la transmisión.

■ De los tipos de modulaciones explorados en el laboratorio no se puede escoger uno mejor que otro ya tienen características y aplicaciones distintas, La Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM) destaca por su eficiencia espectral al transmitir múltiples señales, lo que mejora la capacidad de transmisión de datos y su resistencia al ruido. Sin embargo, su implementación puede ser técnicamente compleja. Por otro lado, la Modulación single side band (SSB) ofrece una mayor eficiencia espectral al eliminar una banda lateral y la portadora, reduciendo el ancho de banda necesario, siendo más adecuada en condiciones de baja señal-ruido. A pesar de sus ventajas, la demodulación de SSB puede ser más compleja y susceptible a errores. La elección entre QAM y SSB depende de las necesidades específicas de la aplicación, considerando la eficiencia espectral, la capacidad de transmisión de datos y la complejidad de la implementación[3].



3. Conclusiones

- Transmitir la portadora en modulaciones lineales es esencial para facilitar la recuperación precisa de la señal original, establecer la referencia de tiempo y optimizar la eficiencia espectral.
 - QAM ofrece eficiencia espectral y resistencia al ruido, pero su aplicación puede llegar a ser compleja. SSB destaca en eficiencia espectral, pero su demodulación es más compleja. La elección depende de requisitos específicos de la aplicación.
 - Es posible encontrar el índice de modulación por distintos métodos, el primero es conociendo los parámetros de amplitud del mensaje y el valor del coeficiente de sensibilidad de amplitud, otro puede ser graficamente con ayuda del osciloscopio, se puede encontrar la amplitud del mensaje en la envolvente y hacer el cálculo con el coeficiente de sensibilidad o diviendo con la amplitud de la portadora, otro es con el analizador de espectro teniendo en cuenta la ecuación de Ndb.
 - El índice de modulación depende de parámetros como el coeficiente de sensibilidad, la amplitud del
- mensaje y la amplitud de la portadora.
- La práctica abordó la teoría necesaria para lograr adoptar las habilidades esenciales para el uso de las comunicaciones lineales y poder entender mas o menos algunos casos ocurrientes en la vida real.

Referencias

- [1] Z. L. Q. S. W. Wang, F. Li and Z. Li, "Dual-drive mach-zehnder modulator-based single sideband modulation direct detection system without signal-to-signal beating interference," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 16, pp. 1-10, June 2020.
- [2] M. M. S. R. Sabri and H. Mosallaei, "Single sideband suppressed carrier modulation with spatiotemporal metasurfaces at near-infrared spectral regime," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 12, pp. 3802–3813, 15 June, 2022.
- [3] Y. W. et al, "Qam vector mm-wave signal generation based on optical orthogonal polarization ssb scheme by a single modulator," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 24, pp. 7628–7635, 2021.