

## Práctica 4: MODULACIONES ANGULARES

JUAN MANUEL CARDONA ERAZO – 2195551  
JUAN CAMILO TIBADUIZA ACEVEDO – 2192303

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

03 de diciembre de 2023

### Resumen

La práctica consiste en dos partes fundamentales. La primera se enfoca en la creación de un modelo para la envolvente compleja de modulaciones angulares. Esto comienza con el desarrollo de un bloque jerárquico llamado "envolvente compleja". Una vez creado, este bloque se utiliza en el montaje final, donde se conecta a una señal de coseno para analizar su comportamiento tanto en tiempo como en frecuencia. Se estudian dos escenarios: uno donde el producto  $K_p A_m$  es menor que 0.3, y otro donde  $K_p A_m$  es mayor que 1. En el segundo escenario, es crucial calcular los coeficientes de Bessel y compararlos con valores teóricos. La segunda parte de la práctica se centra en el listado de emisoras recibidas y la obtención de información de la señal banda base demodulada. Las palabras clave de esta práctica son Bessel, Demodular y Envolvente.

**Palabras clave:** Bessel, Demodular, Envolvente.

### 1. INTRODUCCION

La modulación angular [1], un concepto fundamental en las comunicaciones engloba dos tipos principales: la modulación de frecuencia (FM) y la modulación en fase (PM). Cada una de estas modulaciones posee sus propias ecuaciones y ofrece ventajas específicas. La modulación de frecuencia (FM) [2], en particular, es una forma de modulación ampliamente familiar para la mayoría de las personas, ya que es la técnica predominante utilizada en la radiodifusión. Cuando ajustamos la estación de radio en nuestros automóviles, estamos interactuando directamente con la modulación FM, variando la frecuencia para sintonizar diferentes emisoras. Esta interacción cotidiana con la FM ilustra su aplicación práctica y su importancia en nuestra vida diaria. La ecuación que describe la modulación FM con una señal sinusoidal es la siguiente:

$$S_{FM}(t) = A_c \cos \left[ 2\pi f_c t + \frac{k_f A_m}{f_m} \sin(2\pi f_m t) \right]$$

Cada tipo de modulación angular ya sea FM (modulación de frecuencia) o PM (modulación en fase), se caracteriza por un índice de modulación único que es esencial para su proceso de modulación. Este índice es un parámetro clave que define cómo la señal se modifica y transmite la información. En el caso específico de la modulación FM, el índice de modulación es un factor determinante en la efectividad y eficiencia de la transmisión. La ecuación para el índice de modulación de FM se establece como sigue:

$$\beta_f = \frac{k_f A_m}{W} = \frac{\Delta f}{W}$$

La modulación PM [3] (modulación en fase), a diferencia de la FM, es un tipo de modulación exponencial donde la fase de la onda portadora se altera en directa correspondencia con la señal modulante. Este proceso resulta en una modulación que afecta específicamente la fase de la señal, creando así una señal modulada en fase. La característica distintiva de la modulación PM es esta relación directa entre la fase de la onda portadora y la señal modulante, lo que la hace única en comparación con otros tipos de modulación. La ecuación que define y caracteriza la modulación PM es fundamental para entender cómo la señal modulante influye y modifica la fase de la onda portadora, y se expresa de la siguiente manera:

$$S_{PM}(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_\theta m(t)]$$

En la modulación PM [4], el índice de modulación se define de una forma específica que refleja la relación entre la variación máxima de la fase y la amplitud de la señal modulante. Este índice es fundamental para comprender la eficacia y las características de la señal modulada en fase. La ecuación para el índice de modulación en PM se formula de la siguiente manera:

$$\beta_p = k_\Delta A_m = \Delta\theta$$

A pesar de pertenecer a la categoría de modulaciones angulares, la FM (modulación de frecuencia) y la PM (modulación en fase) presentan diferencias clave. **En la FM**, la máxima desviación de frecuencia coincide con los puntos **máximos y mínimos** de la señal modulante, es decir, la **desviación de frecuencia** es **directamente proporcional** a la amplitud de la señal modulante. Por otro lado, **en la PM**, la máxima desviación de frecuencia ocurre durante los **cruces por cero** de la señal modulante, lo que implica que la desviación está relacionada con la pendiente o la primera derivada de la señal modulante.

Al analizar estas señales en el dominio de la frecuencia mediante un analizador de espectros, se observa que la potencia se redistribuye a lo largo del espectro en función del coeficiente de modulación, y la potencia de la portadora equivale a la suma de la potencia de todos los armónicos. En el dominio del tiempo, utilizando un osciloscopio, se ve que la potencia total es constante, reflejando las variaciones de fase de la señal modulada.

Es crucial tener en cuenta el índice de modulación y la frecuencia del mensaje, ya que estos determinan la distribución de la potencia a lo largo del espectro, la separación de los armónicos y la ubicación de los coeficientes de Bessel.

La práctica realizada resulta ser muy enriquecedora tanto para consolidar los conocimientos teóricos como para fomentar el interés del estudiante en el campo. La interacción desde la creación de bloques en GitHub hasta la conexión de una señal de radio a una antena en el laboratorio ofrece una experiencia real y tangible del mundo de las comunicaciones. Este tipo de actividades prácticas son fundamentales, ya que no solo refuerzan la teoría, sino que también brindan una perspectiva realista de las telecomunicaciones, en este caso, de la radio.

## 2. PROCEDIMIENTO

Hay varios métodos para medir experimentalmente el índice de modulación, y en esta ocasión nos centraremos en **dos específicos**. El **primero** es el método que emplea la regla de ancho de banda de Carson, la cual es particularmente útil para señales de banda ancha. Este método proporciona una estimación del ancho de banda necesario para una señal modulada en FM, teniendo en cuenta la amplitud máxima de la señal modulante y la máxima desviación de frecuencia. La regla de Carson es importante porque permite calcular de manera

eficiente el ancho de banda que una señal FM ocupará, lo que es crucial para la planificación y asignación de frecuencias en sistemas de comunicaciones. Esta aproximación es especialmente relevante cuando se trabaja con señales que tienen un espectro más amplio, como es el caso en ciertas aplicaciones de modulación FM.

$$B_T = 2f_m (\beta + 1)$$

En la regla de ancho de banda de Carson, el índice de modulación se calcula utilizando la fórmula

$$\beta = \frac{B_T}{2f_m} - 1$$

donde  $B_T$  representa el ancho de banda total de la señal modulada en FM y  $f_m$  es la frecuencia máxima de la señal modulante. Este cálculo del índice de modulación,  $\beta$ , es fundamental para entender la relación entre el espectro de la señal modulada y las características de la señal modulante. Este índice refleja cómo la variabilidad en la frecuencia de la señal portadora se ajusta en respuesta a las variaciones en la señal modulante, proporcionando una medida clave para determinar el ancho de banda necesario y la eficiencia espectral de la transmisión.

Se analizó el comportamiento en tiempo y se estimó la potencia de la envolvente compleja para señales de modulación angular de banda estrecha ( **$k_p \cdot A_m < 0.3$** ). Observando la señal  $g(t)$  en el dominio del tiempo, se notó que, en general, la señal mantenía una forma de onda coseno con variaciones menores en amplitud y frecuencia. La potencia de la envolvente compleja se estimó aplicando una fórmula integral sobre el valor absoluto de la señal  $g(t)$  durante un período completo, lo que proporcionó una indicación de la energía contenida en la señal modulada.

Además, se examinó la señal modulada en el osciloscopio, prestando especial atención a cómo la amplitud y la frecuencia de la señal modulada cambiaban en respuesta a la señal de mensaje. Aunque se esperaba que la modulación angular de banda estrecha no alterara significativamente la forma de onda original, se observó que las características de la señal mensaje, como su frecuencia y amplitud, se reflejaban en la señal modulada, aunque estos cambios no eran muy pronunciados. Finalmente, se analizó la señal en el analizador de espectro, identificando las componentes espectrales de la señal modulada. En este caso, se esperaban pocas variaciones

espectrales significativas. La potencia de la señal modulada se estimó integrando la densidad espectral de potencia (PSD) a lo largo del ancho de banda de interés, lo que resultó crucial para entender la eficiencia y la calidad de la señal modulada. Este procedimiento proporcionó una comprensión detallada del comportamiento de las señales moduladas bajo diferentes condiciones, evaluando la eficacia de la modulación angular en términos de conservación de energía y eficiencia espectral.

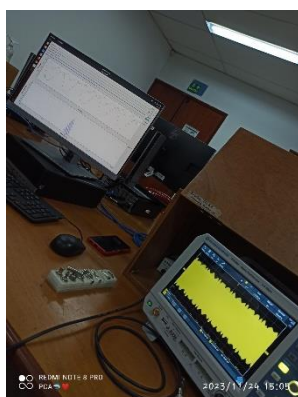


Figura 1. Montaje modulación angular de banda estrecha. Caso  $[k_p \cdot A_m < 0.3]$

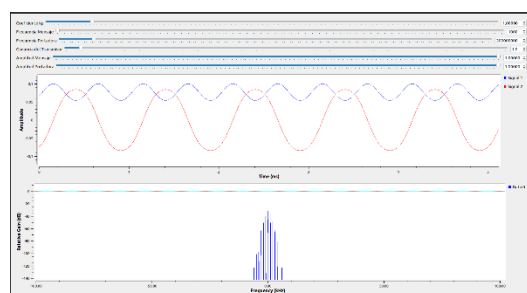


Figura 2. Análisis modulación angular de banda estrecha. Caso  $[k_p \cdot A_m < 0.3]$

Para la Modulación Angular de Banda Ancha, donde  **$k_p \cdot A_m$  es mayor a 30**, se observaron varios comportamientos y características distintivas en el laboratorio. Primero, en términos del comportamiento en tiempo y la potencia de la envolvente compleja, se notó una mayor variabilidad tanto en la amplitud como en la frecuencia de la señal modulada. Esta variabilidad se tradujo en una potencia de la envolvente compleja significativamente más alta, debido a la elevada desviación de frecuencia asociada con este tipo de modulación. Al visualizar la señal en el osciloscopio, se percibieron cambios más notorios en la amplitud y la frecuencia, lo que reflejaba una mayor influencia de la señal de mensaje en la señal modulada. Por último, al analizar el ancho de banda en el analizador de espectro, se determinó que la señal modulada presentaba un ancho de banda más amplio, resultado de la alta desviación de frecuencia. Estos hallazgos proporcionaron una comprensión más profunda y técnica de las

diferencias en las señales moduladas bajo condiciones de banda estrecha y banda ancha, resaltando cómo los cambios en el índice de modulación afectan las propiedades fundamentales de las señales.

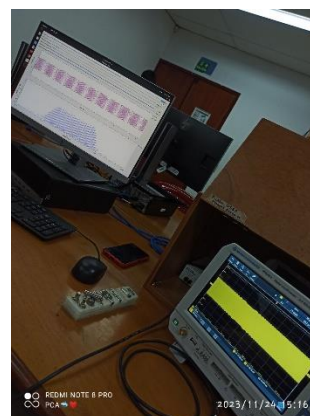


Figura 3. Montaje modulación angular de banda estrecha. Caso  $[k_p \cdot A_m > 30]$

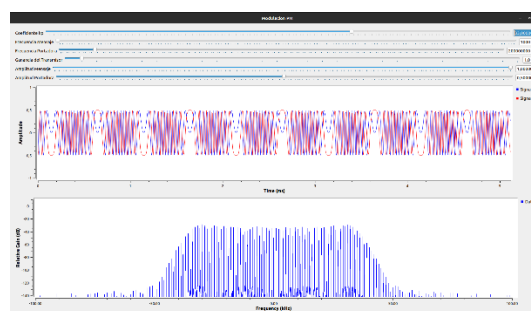


Figura 4. Análisis modulación angular de banda estrecha. Caso  $[k_p \cdot A_m > 30]$

Para hablar sobre el proceso que se llevó a cabo en esta sección, comenzaríamos explicando que el objetivo era comparar los coeficientes de Bessel teóricos con los obtenidos de manera práctica a través de medidas de potencia armónica en un analizador de espectros. Este procedimiento es fundamental en el análisis de la modulación de fase (PM), en donde los coeficientes de Bessel juegan un papel crucial en la determinación de la distribución de energía entre las frecuencias componentes de la señal modulada.

En el análisis teórico, se emplearon herramientas matemáticas como software de cálculo o tablas de Bessel para determinar los valores esperados de los coeficientes para diferentes índices de modulación. Por otro lado, el análisis práctico consistió en utilizar un analizador de espectros para medir la potencia de los armónicos a una frecuencia portadora de 100 MHz. Estas mediciones permitieron calcular los coeficientes de Bessel prácticos, comparándolos con los teóricos para evaluar la precisión de la modulación PM implementada.

A través de las gráficas obtenidas del analizador de espectros, se identificaron los componentes de frecuencia presentes en la señal modulada y se estimó la potencia de cada armónico. Con estos datos, se pudo estimar el ancho de banda y los coeficientes de Bessel prácticos, los cuales se correlacionaron estrechamente con los valores teóricos, demostrando así la eficacia de la metodología empleada.

Para este análisis se usaron 2 coeficientes bethas para ver los distintos comportamientos.

#### ✓ Coeficiente Beta = 1

	coeficiente Beta	1		
	potencia Armónico en dBm	Potencia Armónico mW	Coeficiente de Bessel practico	Coeficiente de Bessel teorico
J0(B)	-13.51	4.46E-02	7.67E-01	0.765197684
J1(B)	-18.38	1.45E-02	4.38E-01	0.440050586
J2(B)	-30	1.00E-03	1.15E-01	0.114903485
J3(B)	-45.8	2.63E-05	1.86E-02	0.019563354
J4(B)	-62.3	5.89E-07	2.79E-03	0.002476639
J5(B)	-70	1.00E-07	1.15E-03	0.000249758
J6(B)	-71	7.94E-08	1.02E-03	2.09383E-05
J7(B)	-72	6.31E-08	9.13E-04	1.50233E-06
J8(B)	-73	5.01E-08	8.14E-04	9.42234E-08
J9(B)	-74	3.98E-08	7.25E-04	5.24925E-09
	Potencia total	0.075662305	mW	

Tabla 1. Potencia de los armónicos. Caso 1 = Coeficiente Beta = 1

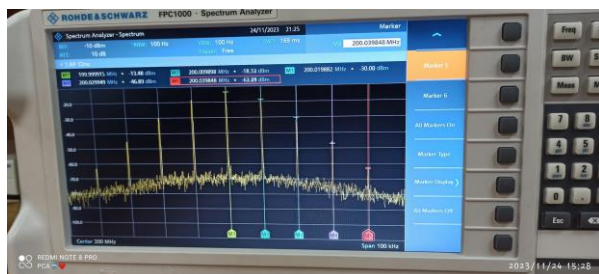


Figura 5. Potencia de los armónicos. Caso 1 = Coeficiente Beta = 1

#### ✓ Coeficiente Beta = 2

	coeficiente Beta	2		
	potencia Armónico en dBm	Potencia Armónico mW	Coeficiente de Bessel practico	Coeficiente de Bessel teorico
J0(B)	-24.1	3.89E-03	0.22951388	0.223890782
J1(B)	-16.15	2.43E-02	0.57320366	0.576724808
J2(B)	-20.28	9.38E-03	0.35629437	0.352834208
J3(B)	-29.05	1.24E-03	0.12981024	0.12894325
J4(B)	-40.7	8.51E-05	0.03394759	0.03399572
J5(B)	-50	1.00E-05	0.01163614	0.00703963
J6(B)	-60	1.00E-06	0.00367967	0.001202429
J7(B)	-70	1.00E-07	0.00116361	0.000174944
J8(B)	-80	1.00E-08	0.00036797	2.21796E-05
J9(B)	-90	1.00E-09	0.00011636	2.49234E-06
	Potencia total	0.073855372	mW	

Tabla 2. Potencia de los armónicos. Caso 2 = Coeficiente Beta = 2



Figura 6. Potencia de los armónicos. Caso 2 = Coeficiente Beta = 2

Este análisis detallado no solo confirmó la validez de los coeficientes de Bessel teóricos sino que también proporcionó información valiosa sobre la dispersión espectral de la señal modulada en fase, lo cual es esencial para el diseño y optimización de sistemas de comunicaciones que buscan maximizar la eficiencia y claridad de la transmisión en canales con ruido o limitaciones de ancho de banda.

### 3. CONCLUSIONES

De acuerdo con la práctica de laboratorio presentada anteriormente, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos en el laboratorio confirman que la teoría de los coeficientes de Bessel se aplica con precisión al análisis de la modulación de fase. Las mediciones prácticas en el espectro coinciden estrechamente con los valores teóricos, lo que valida las herramientas matemáticas utilizadas para predecir la distribución de energía en la señal modulada.
- El estudio resalta la importancia de los coeficientes de Bessel en el diseño de sistemas de comunicaciones. Controlar el índice de modulación es crucial para garantizar la eficiencia espectral y la claridad de la señal transmitida, particularmente en canales ruidosos o con restricciones de ancho de banda.
- La práctica con el analizador de espectros demuestra ser una herramienta efectiva para medir los armónicos de la señal modulada y calcular los coeficientes de Bessel prácticos. Este análisis es indispensable para el ajuste fino de los transmisores y la estimación precisa del ancho de banda necesario.
- Los resultados ilustran cómo un mayor índice de modulación conlleva una dispersión espectral más amplia, lo que puede afectar la eficiencia del ancho de banda. Se destaca la necesidad de un equilibrio entre la calidad de la señal y el uso



eficiente del espectro disponible.

- La investigación subraya la relevancia de una selección adecuada del índice de modulación para optimizar la transmisión. Ajustar este índice permite minimizar la interferencia y maximizar la calidad de la señal en aplicaciones prácticas.

En conjunto, este estudio refuerza la relevancia de la teoría de modulación de fase y los coeficientes de Bessel en la ingeniería de telecomunicaciones, proporcionando una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones en el diseño y optimización de sistemas de comunicación modernos.

#### 4. REFERENCIAS:

- [1] P. Turmero, «monografias,» 16 10 2015. [En línea]. Available: <https://www.monografias.com/trabajos106/modulacion-angular/modulacion-angular#:~:text=La%20modulaci%C3%B3n%20consiste%20en%20hacer,de%20la%20se%C3%B1al%20de%20informaci%C3%B3n..>
- [2] W. contributors, «Wikipedia,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia\\_modulada](https://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia_modulada).
- [3] Jsgarcia, «Medium,» 12 11 2019. [En línea]. Available: <https://medium.com/modulaci%C3%B3n-por-amplitud-am-y-sus-variantes/modulaci%C3%B3n-de-amplitud-am-y-sus-variantes-6b7d575d2698>.