

Práctica 4: MODULACIONES ANGULARES

CAMILA ANDREA BELEÑO CABARLES - 2204280
NICOLAS CHAPARRO TOLOSA - 2201605

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

03 de diciembre de 2023

Resumen

Esta práctica se centró en la implementación de modulaciones angulares, específicamente modulación de fase (PM) para así lograr simular modulaciones de frecuencia (FM) en GNU-Radio. A continuación, se analizaron las diferencias y limitaciones entre estos dos tipos de modulaciones; En el transcurrir de la realización de la práctica se observó que es posible lograr FM a partir de PM, se encontró que hay desafíos en linealidad, sensibilidad al ruido y ancho de banda, en donde también es recomendable el uso de moduladores FM dedicados para una modulación más precisa y eficiente.

Palabras clave: PM, FM Modulación, ancho de banda, linealidad.

1. Introducción

- Al realizar y analizar las mediciones de emisoras en el laboratorio, se observó que estas mediciones llegan a ser muy importantes puesto que permite evaluar de manera precisa el rendimiento de las emisoras. En GNURadio puede escuchar, medir el ancho de banda analizando si están en el rango establecido, la distorsión y la calidad de la señal. Después de todo esto se puede concluir si dicha emisora cumple con los estándares y especificaciones requeridas. Con el software se puede obtener y saber manejar: diseño y simulación de sistemas de comunicaciones, ya que este permite crear diagramas de flujo y a su vez configurarlos de manera conveniente para implementar los sistemas de comunicaciones que requiero, logrando así, explorar y experimentar un sin fin de configuraciones buscando que se satisfagan los objetivos propuestos. Además, este software permite la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías ya que gracias a la flexibilidad del programa se puede experimentar con algoritmos de modulación, esquemas de antenas y demás aspectos de los sistemas transmisión[1]..
- Las modulaciones angulares (FM, PM) presentan varias ventajas sobre las modulaciones lineales (AM). Entre estas ventajas se pueden resaltar: 1) Mayor inmunidad al ruido, ya que la información se transmite a través de cambios de frecuencia en lugar de amplitud, lo que resulta en una mejor calidad de la señal, facilitando la recuperación de la información. 2) Eficiencia espectral, gracias a que su información está en frecuencia, se aprovecha de manera más eficiente el espectro disponible, es decir, se puede transmitir más información dentro de un mismo ancho de banda. Finalmente, hay menor sensibilidad a la atenuación de frecuencia, lo que ocurre cuando algunas frecuencias del canal se atenúan más que otras, y la modulación FM tiene una mejor tolerancia a esta atenuación selectiva, haciendo que la calidad de la señal recibida sea mejor[2].
- A la hora de medir el tipo de modulación angular en instrumentos utilizados en el laboratorio se deben tener en cuenta una serie de factores entre los que se encuentran: 1) El ancho de banda: Es importante resaltar que debido a que este tipo de modulaciones ocupan un mayor ancho de banda, se tiene en cuenta como una consideración importante ya que este debe ser el adecuado para no perder información de la señal modulada. 2) Tiempo de muestreo y resolución temporal: Al ser modulaciones angulares, pueden presentar cambios rápidos de frecuencia y lo ideal es que el osciloscopio puede capturar estos cambios. 3) RBW Y SPAN: Son parámetros que se deben tener en cuenta, ya que RBW debe ser lo suficientemente pequeño como para obtener toda la información, o al menos la más importante, e incluso capturar los cambios que puedan ocurrir en la señal; SPAN debe ser lo suficientemente amplio para soportar toda la información en el espectro de interferencia[3].

- Al generar señales moduladas angulares de banda ancha desde un Software Defined Radio (SDR), es crucial considerar: 1) Ancho de Banda: Asegurar que la señal generada no exceda el ancho de banda permitido por el sistema y las regulaciones. 2) Frecuencia de Muestreo: Seleccionar una frecuencia de muestreo adecuada para evitar el aliasing y garantizar la representación precisa de la señal. 3) Sincronización de Reloj: Mantener una sincronización precisa entre el reloj del SDR y la señal modulada angular para evitar problemas de desfase y distorsión. 4) Fase y Amplitud Constantes: Garantizar que la fase y la amplitud de la señal modulada se mantengan constantes para evitar distorsiones no deseadas. 5) Calibración del SDR: Realizar una calibración adecuada del SDR para minimizar errores en la generación de la señal. 6) Supresión de Espurias: Minimizar la presencia de espurias y armónicos para cumplir con los estándares de emisión electromagnética y evitar interferencias no deseadas. 8) Potencia de Salida: Ajustar la potencia de salida de la señal para cumplir con los límites reglamentarios y evitar problemas de interferencia. 9) Filtrado: Aplicar filtros para limitar el ancho de banda y reducir la presencia de interferencias y ruido fuera de la banda deseada.
- En toda la realización de la práctica se adquirieron distintas habilidades, entre estas: 1) Conocimiento de medición: Se lograron adquirir habilidades con el uso del osciloscopio y analizador de espectro, y a su vez un mejor manejo del software al momento de realizar el laboratorio con diferentes tipos de señales y objetivos. 2) Manipulación de señales: Esta habilidad se desarrolló a medida que se generaban señales, y se buscaba visualizarlas en el osciloscopio y analizador de espectros con el fin de que no se perdiera información relevante. 3) Análisis e interpretación de datos: A medida que la práctica se iba culminando, se pudo observar que se consiguió un mejor criterio a la hora de observar las gráficas y datos obtenidos, logrando analizar su veracidad y comprendiendo de manera efectiva sus resultados.

2. Procedimiento

Para tener un orden en el desarrollo de la práctica, esta se dividió en unas fases:

- FASE 1) MONTAJE DE DIAGRAMA DE BLOQUES EN GNURADIO: En esta primera fase, se realiza el montaje que cumple con la primera parte del ob-

jetivo de la práctica, el cual es escuchar y observar las emisoras comerciales de la ciudad de Bucaramanga.

- FASE 2) RECONOCIMIENTO DE EMISORAS: En esta segunda fase, se realiza una tabla en excel donde primero por medio de un link de la base de datos de del MINTIC donde se encontraron las emisoras en el radar de Bucaramanga y estas se pueden escuchar variando la frecuencia en el simulador, se pueden escuchar algunas comerciales y otras que no están dentro de la lista. Seguido de esto, está la frecuencia de operación (frecuencia en que se escucha con claridad dicha radio), luego, ancho de banda de la señal recibida (este lo obtuvimos por medio de la simulación y por la regla de los 20dB), además de estos datos, se agregó si existe señal L+R, pilot, señal L-R, señal RBDS y si esta emisora está registrada; los datos anteriores se analizan a partir de una imagen brindada en la práctica donde especifican cual es la onda L+R, la frecuencia aproximada en que se encuentra el impulso de la señal piloto, la forma y frecuencia de la señal L-R, y la frecuencia de RBDS. Esta fase se realiza con el objetivo de analizar si dichas emisoras cumplen con el ancho de banda establecido, observando y escuchando que cuando alguna se pasa del ancho de banda genera una interferencia con la siguiente emisora, afectando la calidad del audio.
- FASE 3) ENSAYO: En esta fase 3, se realiza un ensayo de 200 palabras, en el cual se dio a conocer la opinión que se tuvo acerca de la práctica y la importancia de la misma, logrando concluir que de una buena ejecución y apropiación del reglamento depende la calidad de sonido y servicio que se le brinda al usuario, y que el hecho de que una emisora no cumpla con lo establecido, afecta a la siguiente, ocasionando interferencias y distorsiones en la señal.
- FASE 4) $KpAm < 0.3$ y $KpAm > 30$: En esta fase, se realizó un montaje con la envolvente compleja para incluirlo al diagrama de bloques, y se empezaron a realizar algunas variaciones correspondientes buscando el cumplimiento de cada uno de los requisitos dados en cada caso. En el primer caso, $KpAm < 0.3$, se pudo observar que el comportamiento en el tiempo es una señal coseno, y en la frecuencia se observan los pulsos correspondientes a la portadora y la señal mensaje, cabe mencionar que estos pulsos van disminuyendo en amplitud. Además, se observó que los armónicos del coseno

se reducen a 2 dependiendo del valor K_{pAm} . En el segundo caso, $K_{pAm} > 30$, se notó que la amplitud de la modulación es alta, en donde se espera una mayor distorsión en la envolvente compleja, además para el cálculo de potencia lo que se hace es elevar al cuadrado la señal modulada y calcular la potencia promedio en el dominio del tiempo.

- **FASE 5) CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE BESSEL:** Para esta última fase, se realizó una tabla de excel donde se realizaron algunas comparaciones de los coeficientes de Bessel prácticos y teóricos. Todo este proceso se hizo a través del analizador de espectros, colocando un marcador en el impulso obteniendo así la potencia del armónico, y con la función de BESSEL se calculó inmediatamente el coeficiente de Bessel teórico, luego de esto el coeficiente de Bessel práctico se realizó a partir de unos cálculos con 2 veces la potencia del armónico menos la potencia de la portadora, esto de manera logarítmica.

A partir de las mediciones de las emisoras FM sintonizadas desde el laboratorio:

- Para el diagrama de bloques, inicialmente se definió el bloque options donde van los datos básicos de la modulación a realizar, seguidamente se agregan dos bloques de variable (uno donde se define la frecuencia de muestreo global "samprate" el otro el cual es el factor de diezmo y es utilizado para reducir la cantidad de datos procesados mejorando así el rendimiento del sistema). Luego se agregan 3 bloques de QT GUI Range para definir los parámetros que van a variar en el sistema (Uno es la ganancia del transmisor "GRX", el otro es la frecuencia portadora "fc", y el último es la frecuencia de corte del filtro pasabajas "fcb"). Después de lo anterior, se procede a poner el bloque UHD:USRP Source el cual fue utilizado para conectar el USRP con el PC y así lograr que se visualice en el instrumento de medición, luego se agregaron los bloques QT GUI Frequency Sink y Low Pass Filter los cuales son filtros necesarios para eliminar las componentes de altas frecuencias en la señal demodulada ya que vendrían siendo componentes no deseadas. Finalmente se añade el bloque encargado de demodular la señal FM, el cual es llamado WBFM Receive el cual es el encargado de recibir y demodular la señal proporcionando la salida de audio correspondiente, por lo tanto añaden los bloques FM emphasis (Este es un filtro usado para ajustar la

frecuencia de la señal modulada), también se utilizó el bloque Rational Resampler" (es el encargado de ajustar la frecuencia de muestreo a la frecuencia del audio del PC), con todo lo anterior, ya se añade el Audio Sink el cual, logra la conexión de GNURADIO con el periférico del audio del PC. Es importante mencionar que si sería posible omitir algún bloque, pero este diseño está simplificado de la mejor manera y es el adecuado para realizar la demodulación de manera concreta, directa y eficaz.

- Para definir el ancho de banda de cada una de las emisoras estudiadas en esta práctica, se utilizaron 2 formas efectivas, esa es cuando se ve la gráfica de manera clara y se calcula su ancho de banda utilizando la fórmula $BW = f_2 - f_1$. La segunda forma utilizada también en esta práctica fue aplicando la regla de los 20dB, poniendo la frecuencia donde se escucha la emisora. A continuación, se mostrará una gráfica donde se vea claramente, ya que el programa brinda la opción de "stop" seguido de esto se aplica a dicha imagen del espectro capturado la regla de los 20 dB.



Figura 2: Diagrama de bloques inciso A .

- En una señal banda base de emisoras FM, se pueden encontrar diferentes servicios, como: 1) Música: En las emisoras se pueden encontrar diferentes géneros de música, destinado a que cualquier tipo de oyente se sienta identificado con la emisora en cuestión o puede ir variando la frecuencia hasta encontrar el género de música que más le atraiga. Este servicio es bastante amplio y va desde 87.5 MHz y 108 MHz. 2) Entrevistas y debates: Así como se encuentran emisoras solo destinadas a la música, también hay posibilidad de encontrar algunas que transmitan programas de entrevistas y debates de

temas diversos que incentiven al oyente a permanecer en sintonía, Estas van entre 87.5 MHz y 108 MHz. 3) Noticias y actualidad: Este tema es bastante común en las emisoras, ya que muchos usuarios utilizan esta manera para poder informarse de lo que sucede en su alrededor, este servicio ofrece información sobre el clima, noticias de última hora, detalles acerca del tráfico o problemas en las vías, La frecuencia de estos servicios se encuentran en el rango estándar de las emisoras FM. 4) Deportes: Aquí se encuentran transmisiones de eventos deportivos en vivo, comúnmente de fútbol, ciclismo, etc.; Este servicio se encuentra en el rango estándar de frecuencias de las emisoras FM.

En la segunda parte del laboratorio se estudia la modulación angular. Para esto debemos definir una envolvente que cumpla con las características de la modulación angular:

- Se puede definir una envolvente de modulación angular teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

$$s(t) = \text{Re}\{g(t)e^{j2\pi f_c t}\}$$

- forma polar de $g(t)$

$$g(t) = R(t)e^{j\theta(t)}$$

para el caso de las modulaciones angulares

$$R(t) = A_c$$

$$\theta(t) = k_p * m(t); \text{ caso PM}$$

$$\theta(t) = 2\pi * k_f * \int m(t); \text{ caso FM}$$

Figura 1: Envolvente Compleja Modulación Angular .

Donde se puede observar la forma polar de una envolvente compleja general y luego para el caso particular de las modulaciones angulares. Con esta expresión determinada se puede pasar a GNU radio a realizar un equivalente en diagrama de bloques que permita usar la envolvente compleja de la modulación angular.

- En la primera parte del inciso B de este laboratorio se estudia el índice de modulación de al envolvente compleja en modulación angular, se realiza el siguiente montaje de diagrama de bloques en GNU radio:

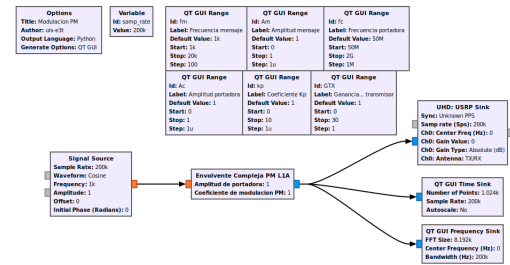


Figura 2: Diagrama de bloques inciso A .

Donde se hace uso del bloque envolvente compleja PM que se realiza teniendo en cuenta los parámetros de la señal envolvente compleja en modulación angular. Después de realizar el montaje se procede a conectar el radio al osciloscopio y a correr el programa, se obtuvieron los siguientes resultados:

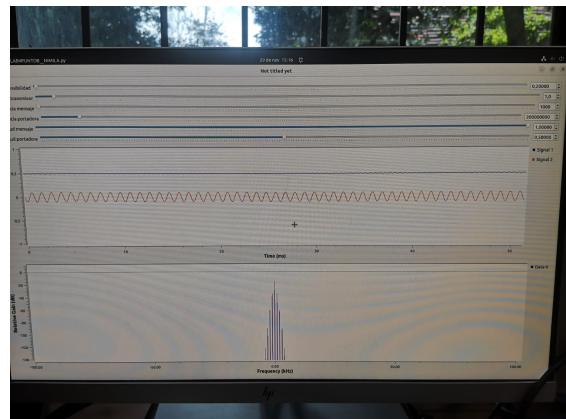


Figura 3: Modulación Angular .

Se puede observar la envolvente compleja en color azul, la portadora en rojo y la respuesta en frecuencia en la parte inferior de la figura 3. Ya que se tiene este resultado, se pueden modificar algunos parámetros para hacer un análisis más profundo, para el análisis del índice de modulación se varía el coeficiente de sensibilidad K_p para observar la respuesta del sistema. El primer estudio que se realizó fue disminuir el coeficiente de sensibilidad hasta que el índice de modulación fuese menor a 0.3, esto con la idea de que en estos valores de índice de modulación la modulación se comportará como una modulación en amplitud, se obtuvo el siguiente resultados:

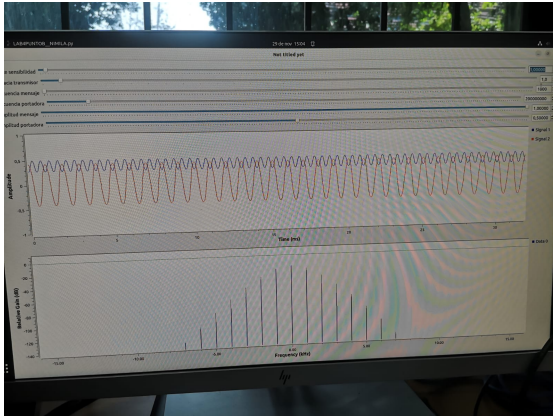


Figura 4: Índice de modulación < 0.3 .

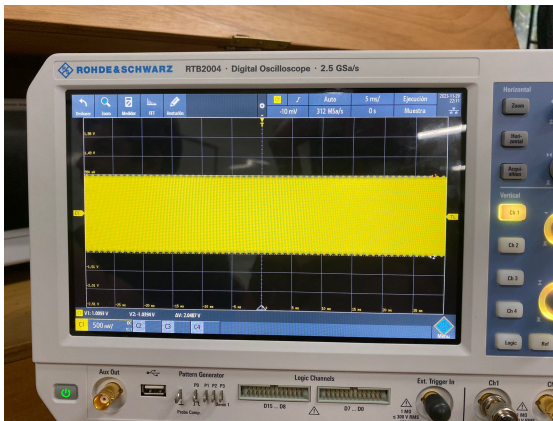


Figura 5: Índice de modulación < 0.3 .

Se puede observar que en el resultado con el simulador la onda azul que representa la envolvente cambia su amplitud a la del mensaje como en una modulación en amplitud, en el osciloscopio también se puede observar esto ya que en los picos de amplitud la forma de onda empieza a hacerse como un senoide. El siguiente análisis que se hizo fue para un índice de modulación mayor a 30, se esperaba que para estos valores la modulación fuese de la forma de una modulación en frecuencia, se varió el índice de modulación a un valor mayor a 30 aumentando el coeficiente de sensibilidad y se obtuvo el siguiente resultado:

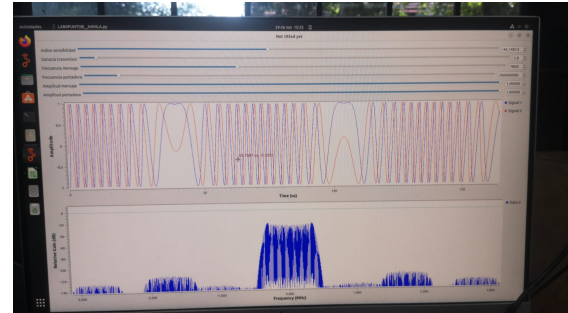


Figura 6: Índice de modulación > 30 .

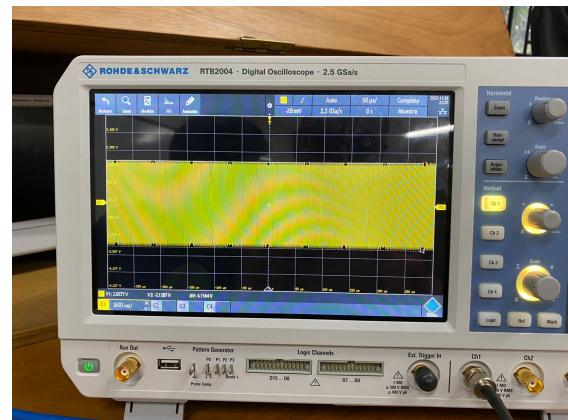


Figura 7: Índice de modulación > 30 .

Donde se puede observar en ambas figuras que la frecuencia de la señal varía, en la simulación es un poco más fácil de notar ya que se puede observar como la envolvente (Señal en azul) varía su frecuencia teniendo en cuenta el mensaje, y en el osciloscopio se puede ver que hay unos mordiscos en la señal indicando cambios en la frecuencia de la señal, indicando que se tiene una modulación en frecuencia.

- En una señal PM, uno de los parámetros clave que se puede medir en un osciloscopio es la desviación de frecuencia. La desviación de frecuencia es la cantidad por la cual la frecuencia instantánea de la onda portadora varía en torno a su frecuencia no modulada. En otras palabras, representa el cambio en la frecuencia de la onda portadora en respuesta a la señal de mensaje. Es posible medir la desviación de frecuencia observando la distancia entre los máximos y mínimos de la onda PM en el dominio del tiempo. En un osciloscopio, se puede utilizar las funciones de medición incorporadas para cuantificar la desviación de frecuencia. Además, también se puede observar visualmente la forma de onda y evaluar la variación de frecuencia en relación con la señal de mensaje.



- En la práctica se observó y se comentó que normalmente cuando se quiere cambiar el índice de modulación se varía el coeficiente de sensibilidad ya que este coeficiente está diseñado para esto, para cambiar el índice de modulación, no es normal ni está bien variar componentes como la amplitud de la portadora o del mensaje porque dependiendo del tipo de información que se transmita, el resultado no será el mismo, se observó que el índice de modulación depende proporcionalmente del coeficiente de sensibilidad y de la amplitud del mensaje.
- Introducir una componente de continua (offset) en la señal de mensaje de un sistema de modulación en frecuencia (FM) afecta la señal modulada al desplazar la frecuencia central, modificar el índice de modulación y potencialmente generar distorsiones espectrales. Este offset puede provocar cambios en la relación entre la amplitud de la señal de mensaje y la desviación de frecuencia, afectando así el rendimiento del sistema FM. Además, la presencia de una componente de continua significativa puede ocasionar problemas como saturación en amplificadores, distorsiones y la aparición de frecuencias no deseadas, lo que debe considerarse al diseñar sistemas de modulación en frecuencia para garantizar una transmisión eficiente y sin distorsiones. La amplitud, el nivel de continua y el ancho de banda del mensaje en las modulaciones angulares, como FM y PM, es crucial para prevenir distorsiones espectrales, optimizar el uso del espectro y cumplir con estándares de transmisión. Limitar el ancho de banda asegura eficiencia en la transmisión de señales y evita interferencias. Además, mantener la amplitud bajo control ayuda a prevenir saturación, distorsiones y optimiza la eficiencia de potencia en el sistema de comunicación, asegurando así un rendimiento confiable y eficiente del sistema. Esto se pudo evidenciar en la práctica porque la señal portadora su amplitud debía ser 0.5 para no generar errores a la hora de correr el programa en GNU radio.
- La parte B de este cuarto laboratorio consistió en el estudio de los coeficientes de Bessel, que se utilizan para describir la variación de la amplitud de la señal modulada. En particular, los coeficientes de Bessel son esenciales para calcular el espectro de frecuencia de una señal modulada en FM. Estos coeficientes ayudan a entender cómo la información se distribuye en torno a la frecuencia central, lo que es crucial para el diseño eficiente de sistemas de comunicación FM y para asegurar una transmi-

sión efectiva de la información a través de ondas electromagnéticas. Para este estudio se comparan los coeficientes de Bessel teóricos y prácticos cuando tenemos un índice de modulación de 3 y 6, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

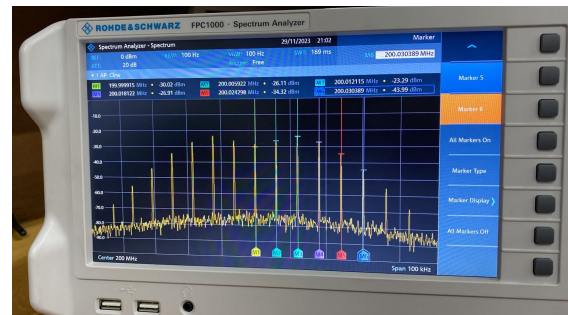


Figura 8: Coeficientes de Bessel, índice de modulación = 3 .

coeficiente Beta 3				
	potencia Armónico en dBm	Potencia Armónico mW	Coeficiente de Bessel practico	Coeficiente de Bessel teorico
0	10(B)	-30	1,00E-03	0,223811813
1	11(B)	-26,11	2,45E-03	0,350253921
2	12(B)	-23,39	4,58E-03	0,479052384
3	13(B)	-26,91	2,04E-03	0,319435373
4	14(B)	-34,32	3,70E-04	0,136107797
5	15(B)	-43,99	3,99E-05	0,044707777
6	16(B)	-53,99	3,99E-06	0,014137838
7	17(B)	-63,99	3,99E-07	0,004470777
8	18(B)	-73,99	3,99E-08	0,001413784
9	19(B)	-83,99	3,99E-09	0,000447078
Potencia total		0,019963376	mW	8,4395E-05

Figura 9: Comparación Teórico vs Práctico índice de modulación = 3 .



Figura 10: Coeficientes de Bessel, índice de modulación = 6 .

		coeficiente Betha 6			
		potencia Armónico en dBm	Potencia Armónico mW	Coefficiente de Bessel practico	Coefficiente de Bessel teorico
0	j0(B)	-35,15	3,05E-04	0,130385318	0,150645259
1	j1(B)	-27,89	1,63E-03	0,300765965	-0,27668386
2	j2(B)	-29,46	1,13E-03	0,25103177	-0,24287321
3	j3(B)	-35,46	2,84E-04	0,125813919	0,114768384
4	j4(B)	-25,68	2,70E-03	0,387907958	0,357641597
5	j5(B)	-25,56	2,78E-03	0,393304295	0,362087078
6	j6(B)	-35,56	2,78E-04	0,124373739	0,245836864
7	j7(B)	-45,56	2,78E-05	0,039330429	0,129586652
8	j8(B)	-65,56	2,78E-07	0,003933043	0,056531991
9	j9(B)	-75,56	2,78E-08	0,001243737	0,021165324
		Potencia total	0,017969774	mW	

Figura 11: Comparación Teórico vs Práctico índice de modulación = 6.

Observando los resultados obtenidos en las tablas se puede ver que son valores cercanos, se estima un error de 0.1 unidades, y estos errores pueden ser múltiples factores, precisión del analizador de espectro, pérdidas en el medio de transmisión en este caso el cable usado.

3. Conclusiones

- La implementación de modulación FM a partir de moduladores PM en GNURadio tiene desafíos co-

mo la linealidad, el ruido y el ancho de banda.

- Medir modulaciones angulares en el analizador de espectro y osciloscopio requiere considerar el ancho de banda, resolución temporal, RBW y SPAN para obtener datos precisos ya que al no ser así podremos distorsionar la señal, tener pérdida de información y ruido en la misma. Por otro lado la señal PM presenta problemas de linealidad y es muy sensible al ruido ya que se codifica la fase de la señal de la portadora.

Referencias

- [1] MarceloDoallo, "Software defined radio y envolvente compleja." [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=Oa_oHguc-sY&ab_channel=MarceloDoallo
- [2] [Online], "Modulacion banda lateral unica." [Online]. Available: <https://academia-lab.com/enciclopedia/>
- [3] Wikiversidad, "Modulaciones angulares." [Online]. Available: https://es.wikiversity.org/wiki/Modulaciones_angulares