

1. Introducción

La modulación es la técnica utilizada para agregar información a una señal portadora. Las modulaciones pueden ser analógicas o digitales. El alcance de la presente experiencia cubre las modulaciones analógicas más comunes.

Una portadora es una señal de amplitud y frecuencia constantes (en términos reales, generadas con la mayor estabilidad requerida por las regulaciones) y que se utiliza dentro de una banda de frecuencias para ubicar una señal que contiene información. Un ejemplo de esto es la banda de Amplitud Modulada, desde 540 a 1600 KHz, donde se ubican señales cuya banda base (el ancho de banda de origen) es de 8 KHz por canal. Es importante recalcar que la información no puede transmitirse en el espectro radioeléctrico en la banda en que fue generada, sino que debe ubicarse en una banda específica, según la asignación de licencia correspondiente. La banda de AM, como ya se indicó, se ubica entre los 540 y los 1600 KHz, mientras que la banda de Frecuencia Modulada (FM) se ubica entre los 88 y 108 MHz. Por otro lado, la banda WiFi(2.4), se ubica entre 2.400 y 2.500 MHz. Los mencionados son algunos ejemplos de asignaciones de banda por el ente regulador, y por los estándares internacionales.

La manera de agregar información a la portadora depende del parámetro a modificar. Si la información se agrega modificando la amplitud de la portadora, este método se denomina modulación por amplitud (también conocido como AM o amplitud modulada). Si la información se agrega modificando la frecuencia de la portadora, el método se denomina modulación por frecuencia (FM, o frecuencia modulada). De igual manera, si la información se agrega modificando la fase, este método es conocido como modulación por fase (PM).

2. Modulación AM

El proceso para agregar información en AM consiste en realizar el producto temporal de la señal de la entrada por la portadora. El resultado es un par de señales, cuyas frecuencias equivalen a la suma y a la diferencia entre las frecuencias de la portadora y la señal de entrada (1).

$$g(t) = A_c[1 + m(t)] \quad (1)$$

Se modula una portadora $\cos(\omega_c t)$, realizando un producto. El resultado es la expresión (2).

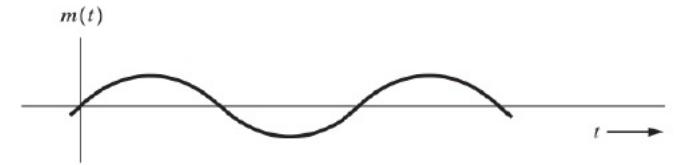
$$g(t) = A_c[1 + m(t)]\cos(\omega_c t) \quad (2)$$

Se considera que la señal modulante o moduladora, es la señal con información, $m(t)$. Esta señal aparece como la envolvente de la señal portadora en AM. La figura 1 ilustra este proceso.

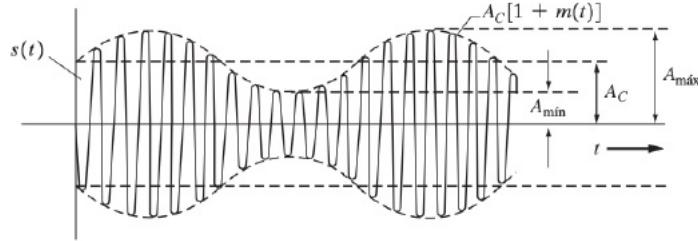
La potencia promedio normalizada de la modulación AM se puede calcular como se muestra en la ecuación (3).

$$\begin{aligned} s^2(t) &= \langle |g(t)|^2 \rangle = \frac{1}{2}A_c^2 \langle [1 + m(t)]^2 \rangle \\ &= \frac{1}{2}A_c^2 \langle [1 + 2m(t) + m^2(t)] \rangle \\ &= \frac{1}{2}A_c^2 + A_c^2 \langle m(t) \rangle + \frac{1}{2}A_c^2 \langle m^2(t) \rangle \end{aligned} \quad (3)$$

En el caso en que la modulación no tenga nivel de continua, entonces el valor promedio de $m(t)$ es cero y la potencia normalizada de la señal AM es (4), siendo el primer miembro la potencia de portadora y el segundo



(a) Onda senoidal moduladora



(b) Señal AM resultante

Figura 1: Modulación AM

la potencia de la banda lateral.

$$s^2(t) = \frac{1}{2}A_c^2 + \frac{1}{2}A_c^2 < m^2(t) > \quad (4)$$

La eficiencia normalizada de la modulación AM (5) se puede obtener como el porcentaje de potencia dedicado a la banda lateral respecto de la potencia total transmitida. Sólo las bandas laterales tienen información.

$$E = \frac{< m^2(t) >}{(1 + < m^2(t) >)} \quad (5)$$

El espectro de voltaje de la señal AM es el establecido por la expresión (6) y responde al cálculo del producto temporal de dos señales, obteniéndose la suma y la diferencia de los espectros de las mismas. Notar que el ancho de banda modulado equivale al doble del ancho de banda de la señal modulante.

$$S(f) = \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + M(f - f_c) + \delta(f + f_c) + M(f + f_c)] \quad (6)$$

La doble banda lateral con portadora suprimida (DBLPS o DSB-SC) es una variante sobre la modulación AM en que la portadora no está presente (7), dando un índice de modulación infinito y una eficiencia del 100 %. Una desventaja de este método es la necesidad de utilizar un demodulador de producto para recuperar la señal. Para la señal AM con portadora se puede utilizar un demodulador de producto o un demodulador no lineal con diodo, siendo este último el más económico y sencillo de implementar.

$$g(t) = A_c m(t) \cos(\omega_c t) \quad (7)$$

En este caso, la señal moduladora $m(t)$ no tiene una componente continua, lo que provoca que la portadora desaparezca. Por lo tanto, el espectro queda solo con las bandas laterales (8).

$$S(f) = \frac{A_c}{2} [M(f - f_c) + M(f + f_c)] \quad (8)$$

Además, para un mismo nivel peak de modulación en amplitud, la potencia de la banda lateral en DSB-SC es cuatro veces la de AM.

Existen variantes respecto de la DSB-SC, a saber, la SSB (Single Side Band, o banda lateral única), que restringe la salida a la mitad superior o inferior del espectro modulado, permitiendo una mayor eficiencia

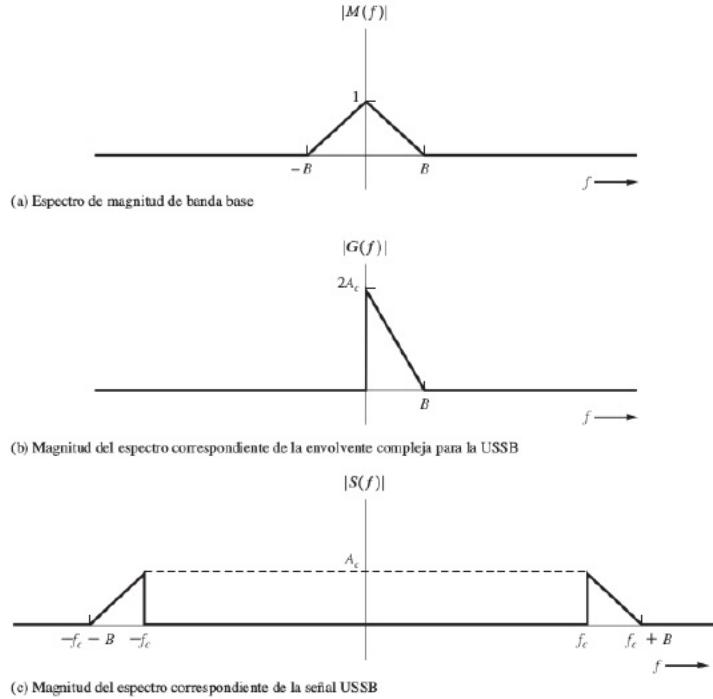


Figura 2: Modulación en Banda Lateral Única

espectral en la transmisión, dado que la mitad restante del espectro se puede obtener por simetría. Sin embargo, la demodulación exige sistemas electrónicos más complejos que encarecen al receptor, restringiéndolo a aplicaciones de comunicación especializadas. La SSB se ilustra en la Figura 2. Finalmente, existe la banda lateral vestigial (BLV o VSB), que se utiliza en TV analógica, y que consiste en un compromiso entre el requerimiento de ancho de banda de la DSB-SC y la complejidad de demodulación en la SSB. Para obtener la VSB, se aplica un filtro de manera de atenuar considerablemente una de las bandas laterales, con el objeto de poder reconstruirla posteriormente. El proceso se observa en la Figura 3.

3. Modulación FM

La modulación FM consiste en aplicar un cambio de frecuencia a una portadora, proporcional al cambio de amplitud de la modulante. Partiendo de la ecuación (9), se puede considerar a la envolvente real $R(t) = |g(t)| = A_c$, donde A_c es constante y la fase $\theta(t)$ es una función lineal a la señal de modulación $m(t)$. Como resultado, $g(t)$ es una función no lineal de la modulación.

$$g(t) = A_c e^{j\theta(t)} \quad (9)$$

Ahora, la señal modulada en ángulo se puede expresar como (10).

$$s(t) = A_c \cos[\omega_c \theta(t)] \quad (10)$$

Y para modulación en fase (PM), ésta es directamente proporcional a la señal moduladora, como en (11), donde D_p es la sensibilidad de fase del modulador. En la modulación en frecuencia, la fase es proporcional a la integral de $m(t)$, como en (12).

$$\theta(t) = D_p m(t) \quad (11)$$

$$\theta(t) = D_f \int_{-\infty}^t m(\sigma) d\sigma \quad (12)$$

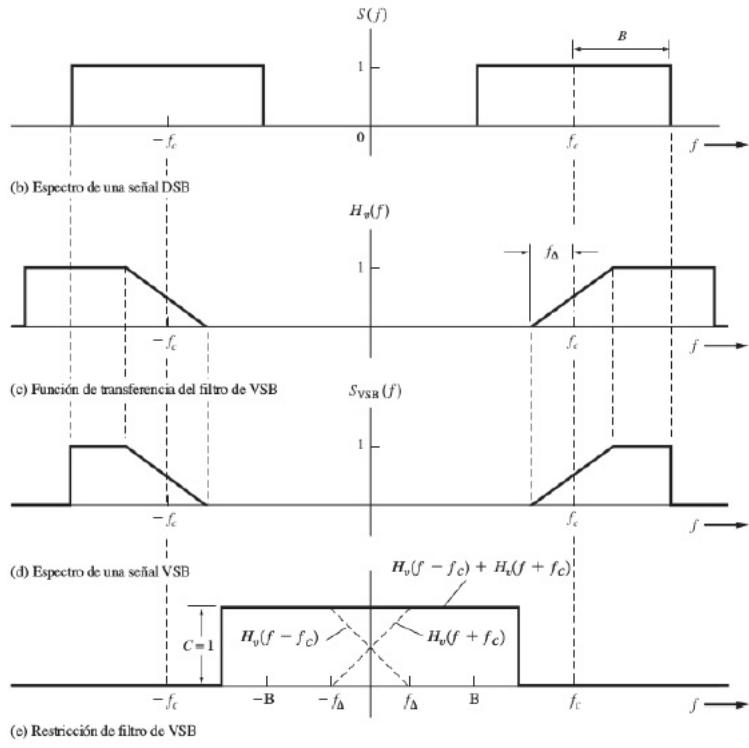


Figura 3: Modulación en Banda Lateral Vestigial

El proceso de modulación FM se ilustra en la figura 4

La frecuencia instantánea corresponde a la expresión de la portadora en ese momento, mientras que la frecuencia en general, se refiere al comportamiento a lo largo del tiempo.

Un parámetro importante es la desviación de frecuencia de la portadora. Esta se puede expresar como $f_d(t)$, tal como se describe en (13).

$$f_d(t) = f_i(t) - f_c = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{d\theta(t)}{dt} \right] \quad (13)$$

Y la desviación peak de frecuencia de portadora se expresa en (14).

$$\Delta F = \max \left\{ \frac{1}{2\pi} \left[\frac{d\theta(t)}{dt} \right] \right\} \quad (14)$$

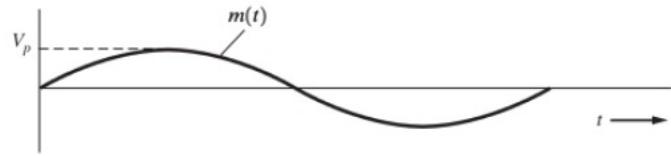
Se establece una relación entre la desviación peak de voltaje y la desviación peak en frecuencia (15), siendo $V_p = \max[m(t)]$. Un aumento de la amplitud de V_p incrementará ΔF , a su vez aumentando el ancho de banda de la señal de FM, pero sin aumentar el promedio de potencia de la señal, que es $A_c^2/2$. Esto genera que aparezcan más componentes espectrales de la señal más alejados de la frecuencia de portadora, y a su vez reduciendo la amplitud de aquellas componentes que están cerca de ella, dado que la potencia es constante. Esto es distinto a la modulación por amplitud, dado que en este caso, el aumento del índice de modulación afecta la potencia total, sin variar su ancho de banda.

$$\Delta F = \frac{1}{2\pi} D_f V_p \quad (15)$$

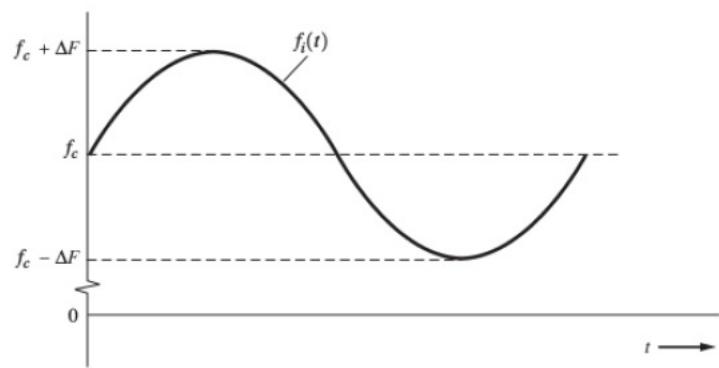
El índice de modulación de frecuencia β_f se obtiene a partir de (16), con B como el ancho de banda de la señal moduladora, en este caso, una senoidal con frecuencia f_m .

$$\beta_p = \frac{\Delta F}{B} \quad (16)$$

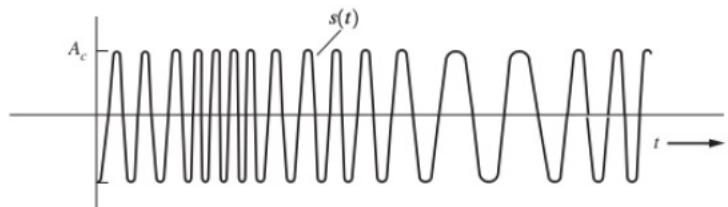
Como se señaló previamente, el espectro de la señal modulada en frecuencia responde a una modulación no lineal. Para modelar el comportamiento del espectro, se toma como referencia una señal y una portadora



(a) Señal moduladora senoidal



(b) Frecuencia instantánea de la señal FM correspondiente



(c) Señal FM correspondiente

Figura 4: Modulación en Frecuencia

senoidales. En el caso de la modulación en frecuencia, la superposición no es válida.

El término m_f en la expresión (17) corresponde a la señal moduladora. En (18) se deriva la función de modulación, a partir de $\beta_f = D_f A_m / \omega_m = \beta$ como el índice de modulación de frecuencia. Esta expresión es periódica para $T_m = 1/f_m$, y se puede representar mediante una serie de Fourier(19).

$$m_f(t) = A_m \cos(\omega_m t) \quad (17)$$

$$g(t) = A_c e^{j\theta(t)} = A_c e^{j\beta \operatorname{sen}(\omega_m t)} \quad (18)$$

$$g(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} c_n e^{jn\omega_m t} \quad (19)$$

Donde cada uno de los coeficientes se calcula según (20), el cual se puede reescribir como (21).

$$c_n = \frac{A_c}{T_m} \int_{-\frac{T_m}{2}}^{\frac{T_m}{2}} \left(e^{j\beta \operatorname{sen}(\omega_m t)} \right) e^{-jn\omega_m t} dt \quad (20)$$

$$c_n = A_c \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{j\beta \operatorname{sen}(\theta - n\theta)} d\theta \right] = A_c J_n(\beta) \quad (21)$$

Esta integral es la función de Bessel del primer tipo de n -ésimo orden, la cual sólo tiene evaluación numérica. Los valores de la función se pueden obtener en tablas. Para ilustrar su comportamiento, la figura 5 muestra la función de Bessel para distintos órdenes de n en función de β .

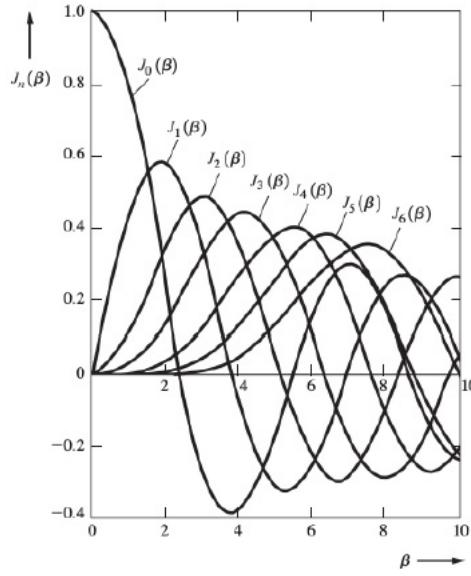


Figura 5: Funciones de Bessel

Si se calcula la Transformada de Fourier a ambos lados de la expresión (19), se obtiene (22), que se puede calcular respecto de las funciones de Bessel, como en (23).

$$G(f) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} c_n \delta(f - f_m) \quad (22)$$

$$G(f) = A_c \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} J_n(\beta) \delta(f - f_m) \quad (23)$$

El espectro para $f > 0$ se muestra en la figura 6 para distintos valores de β . Algo a recalcar es que la amplitud de la portadora es directamente proporcional a $|J_0(\beta)|$ haciéndolo dependiente del índice de modulación. La amplitud de la portadora es cero cuando $\beta=2.4, 5.52,\dots$

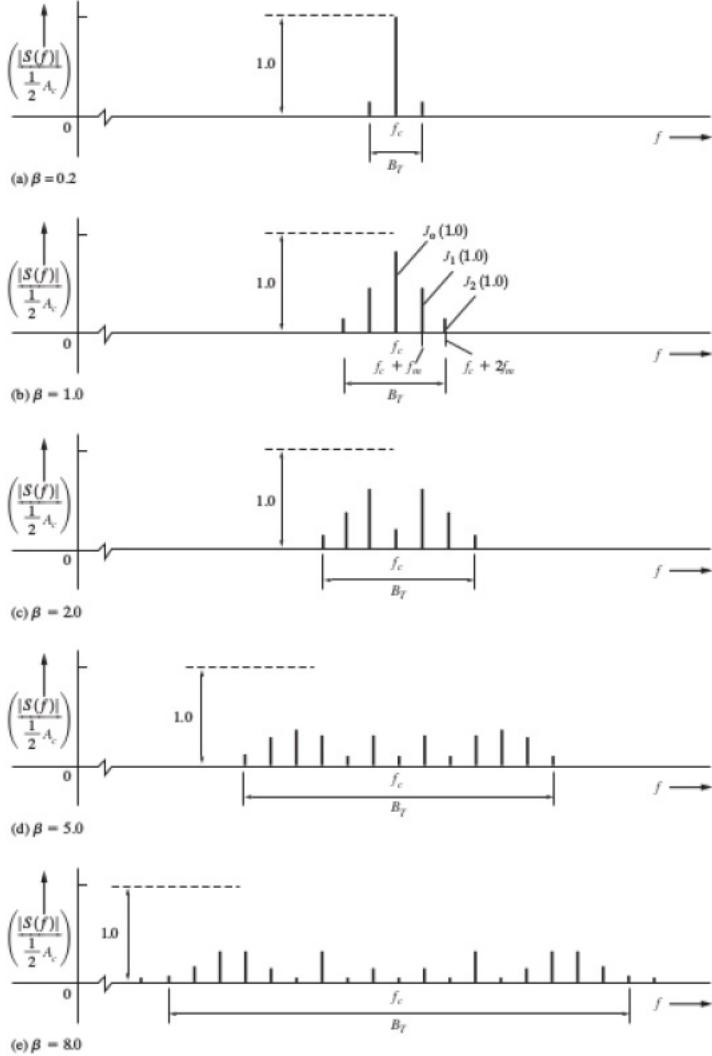


Figura 6: Espectro FM para distintos índices de modulación

Una conclusión que también se puede extraer de la figura 6 es que el ancho de banda de la señal de FM depende de β y de f_m . Además, el 98 % de la potencia total se encuentra en el ancho de banda B_T , definido en (24).

$$B_T = 2(\beta + 1)B \quad (24)$$

donde β es el índice de modulación y B es el ancho de banda de la señal moduladora. Si esta fuera senoidal, sería f_m . Este cálculo empírico se denomina Regla de Carson.

4. Instrucciones

En base a la presente guía del laboratorio, la presentación grabada, y con el soporte bibliográfico señalado, utilice GNU Radio para realizar las siguientes tareas:

1. Construya un modulador AM utilizando la modulación de producto. Conecte a la salida de su modulador un osciloscopio y un analizador de espectros de GNU Radio. Utilice de entrada un archivo wav. Para su modulador, considere utilizar una frecuencia de “onda larga”, de manera de no sobreexigir al computador en el proceso.
2. Construya un demodulador AM utilizando un detector de envolvente y un filtro pasabajos (se explicará esta configuración en el laboratorio). Este demodulador debe recibir la señal modulada construida en el punto anterior. Conecte un analizador de espectro, un osciloscopio y un wav Sink de GNU Radio para revisar la señal demodulada. Compárela con la señal de banda base emitida (el archivo .wav). ¿Qué diferencias, si es que las hay, percibe?
Nota: Para integrar el modulador y el demodulador, puede utilizar los módulos Virtual Sink y Virtual Source de GNU Radio, respectivamente.
3. Construya un modulador FM utilizando el módulo WBFM Transmit. Utilice un archivo .wav como señal a modular. Aplique un analizador de espectro de GNU Radio a la salida, para observar los espectros que se obtienen. Utilice una frecuencia de la banda de broadcasting de FM.
4. Construya un demodulador FM utilizando el módulo WBFM Receive. Conecte un analizador de espectro, un osciloscopio y un wav Sink de GNU Radio para revisar la señal demodulada. Compárela con la señal de banda base emitida (el archivo .wav). ¿Qué diferencias, si es que las hay, percibe?
Nota: Para integrar el modulador y el demodulador, puede utilizar los módulos Virtual Sink y Virtual Source de GNU Radio, respectivamente.
5. Aplique el módulo USRP Sink a la salida de su modulador AM, y realice los ajustes correspondientes para realizar una transmisión en alguna frecuencia de la banda de 900 MHz. Coordíñese con otro grupo de trabajo, para que reciba su transmisión, y diríjase con su proyecto a una de las estaciones preparadas para emitir y recibir señales. Alternativamente, se habilitará un generador de señales emitiendo un tono puro en modulación AM, con frecuencia de portadora a especificar en el Laboratorio. Puede utilizar esta señal para probar su demodulador.
6. Aplique el módulo USRP Source a la salida de su modulador AM, y realice los ajustes correspondientes para realizar una transmisión en alguna frecuencia de la banda de 900 MHz. Trabaje conjuntamente con otro grupo de trabajo para recibir la señal que aquel emita. Diríjase con su proyecto a la estación de trabajo habilitada para la emisión y recepción de señales.
7. Utilice el módulo USRP Sink en su modulador FM, y transmita su señal desde una de las estaciones habilitadas. Verifique con una de las radios FM disponibles en el laboratorio, que la señal se transmite correctamente.
8. Aplique el módulo USRP Source a su demodulador FM, y reciba la señal en la frecuencia elegida.

4.1. Informe Final

Redacte un informe que no sobrepase las 3000 palabras, que contenga:

1. Resumen.
2. Descripción de los experimentos.
3. Resultados (numéricos y gráficos).
4. Análisis de resultados.
5. Dificultades encontradas.
6. Conclusiones.
7. Bibliografía

4.2. Pauta de Corrección

Para la corrección de este Laboratorio se tomará en cuenta:

- Ortografía: No se tolerarán más que 2 errores ortográficos como máximo (descuento de 1 décima por error ortográfico adicional).
- Presentación: Todas las secciones mencionadas deben existir en el informe.
- Extensión y formato: Deben respetarse la extensión máxima y el formato especificado.
- Calidad del análisis de los resultados: Debe contener de manera clara y precisa la explicación de por qué se observa este comportamiento de acuerdo a las mediciones.
- Presentación de gráficos: Las figuras y tablas deben tener ejes en las unidades y etiquetas correspondientes.
- Claridad y especificidad en la explicación de la metodología en la introducción y su coherencia con los resultados mostrados.
- Las conclusiones deben resumir los puntos importantes del informe, y sus principales observaciones y hallazgos.

Referencia: Esta experiencia utiliza como referencia el texto "Sistemas Comunicación Digitales y Analógicos", de León W. Couch, Capítulo 5.