

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL FACULTAD
REGIONAL CÓRDOBA

ELECTRÓNICA APLICADA III

TRABAJO PRÁCTICO N° 5

Moduladores/Demoduladores

CURSO:5R1 AÑO:2015

Autores:

GALETTI Agustín
GRAGLIA Federico
MONTAÑO Jorge
SOLIS Abel Fredy

Legajo:

57705
59667
59040
59156



1. Introducción

Un modulador puede definirse como un elemento que modifica las características de una señal (generalmente amplitud, frecuencia o fase) en función de las características de otra. La primera señal mencionada es la *portadora* mientras que la segunda se conoce como *moduladora* o *banda base* y es la información que se desea transmitir por medio de un canal, por lo que como resultado el modulador presentará en su salida una señal que se denomina *onda modulada*. La modulación forma parte del proceso de transmisión, se emplea un modulador el cual permite trasladar la información presente en la banda base hacia frecuencias mayores dadas por la señal portadora. Se modula porque los medios elegidos para llevar a cabo la comunicación se comportan de manera tal que la transmisión de información en forma de ondas electromagnéticas a estas frecuencias son más realizable que a frecuencias bajas.

En el lado del receptor debe realizarse el proceso inverso, es decir, la obtención de la banda base a partir de la señal modulada. Para realizar esta tarea se utilizan demoduladores. Un sistema básico de comunicación puede modelarse como se muestra en la figura 1 donde se omiten elementos como amplificadores o transductores que son útiles para la obtención de la banda base a partir de algún fenómeno físico y la recuperación de la información a partir de señales eléctricas.

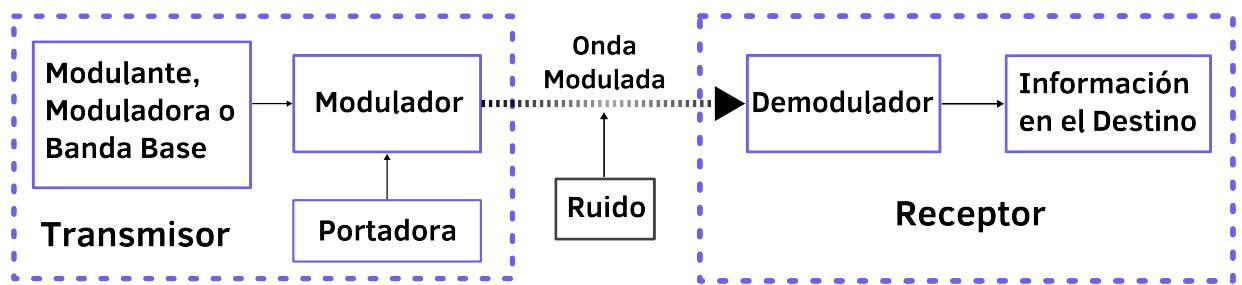


Figura 1: Diagrama de un sistema de comunicación.

Los elementos mencionados anteriormente forman los denominados *sistemas de comunicación*.

Dependiendo del tipo de señales tomadas como portadoras y moduladoras las técnicas de modulación pueden clasificarse según:

- Portadora digital banda base digital. Codificación NRZI, AMI, Manchester, HDB3, etc.
- Portadora analógica, banda base digital. ASK, FSK, PSK, etc.
- Portadora digital, banda base analógica. Modulaciones por pulsos: PAM, PPM, PWM, PCM.
- Portadora analógica, banda base analógica. AM, FM, PM junto a sus variantes.

Además, pueden obtenerse sub-clasificaciones de acuerdo a las características que debe poseer el sistema MOD/DEM. En el presente trabajo se desarrollan dos modulaciones de los tipos analógico-analógica y analógico-digital.

2. Desarrollo

En el presente trabajo se desarrollan dos modulaciones de los tipos analógico-analógica y analógico-digital. Se presentan los circuitos/esquemas, principio de funcionamiento, desarrollo de las ecuaciones fundamentales, mediciones y/o simulaciones según corresponda.

2.1. Modulación de amplitud (AM)

Este tipo de modulación es del tipo portadora analógica con moduladora analógica en la cual la amplitud $A(t)$ de la señal portadora (en la notación suele utilizarse *carrier*) varía en función de la señal moduladora $x(t)$

$$A(t) = A_C + x(t)$$

Donde A_C es la amplitud de la portadora. Para producir la señal de amplitud modulada ϕ_{AM} resta multiplicar la señal anterior por una senoidal a la frecuencia deseada ω_C .

$$\phi_{AM}(t) = [A_C + x(t)] \cos(\omega_C t) \quad (1)$$

Cuyo espectro en el dominio de la frecuencia viene dado por

$$\Phi_{AM}(\omega) = \frac{1}{2}X(\omega + \omega_C) + \frac{1}{2}X(\omega - \omega_C) + \pi A_C \delta(\omega + \omega_C) + \pi A_C \delta(\omega - \omega_C) \quad (2)$$

A partir de estas relaciones se puede decir que la moduladora se encuentra presente como la envolvente de la señal modulada, como puede verse en la figura 2 para una modulante senoidal.

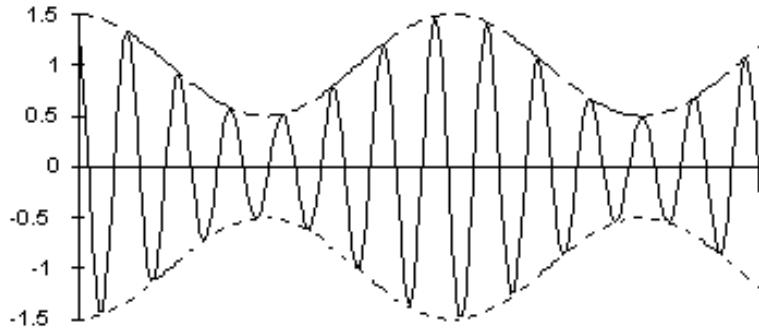
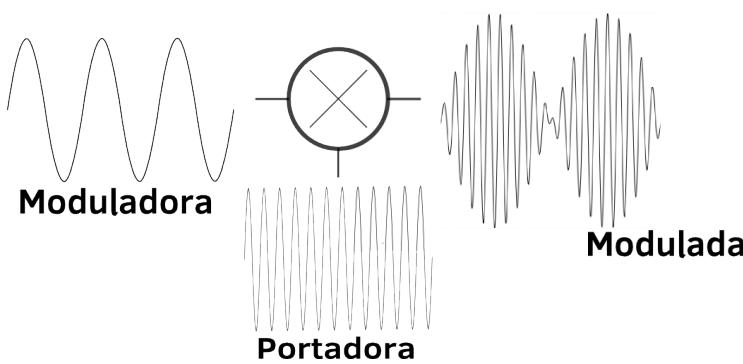


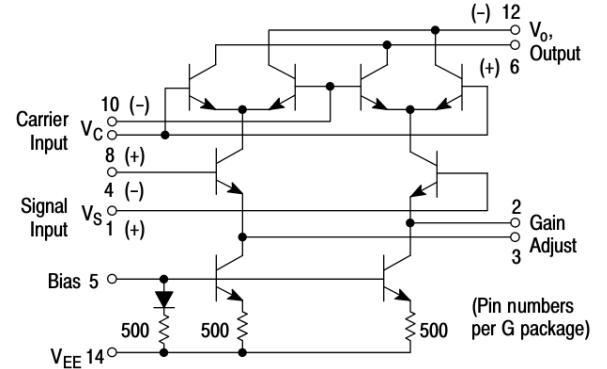
Figura 2: Señal modulada en amplitud.

Entonces a partir de esta señal puede obtenerse la banda base detectando la envolvente. Este procedimiento puede llevarse de forma coherente (sincrónica, empleando una senoidal a la misma frecuencia que la portadora) o no coherente (asincrónica, empleando un elemento alineal y luego filtrando). Por otro lado una rápida inspección de la ecuación (2) permite observar que el ancho de banda empleado por esta modulación es el mismo que el de la banda base¹, debido a que este se “traslada” a la frecuencia dada por la señal portadora. Esto se debe a que la modulación se lleva a cabo realizando el producto de las señales en el dominio del tiempo, lo que se corresponde con la convolución en el dominio de la frecuencia, esta propiedad de la transformada de Fourier se denomina propiedad de modulación. De acuerdo a lo descrito anteriormente el elemento modulador consiste básicamente en un multiplicador en el dominio temporal el cual se muestra en la figura 3(a). Si la señal a la salida se amplifica y se transmite la técnica se denomina modulación de amplitud con portadora suprimida (o doble banda lateral con portadora suprimida, *DSBSC*), si a la salida se suma nuevamente la portadora la técnica es AM convencional.

¹Si se tiene en cuenta que la banda base tiene un espectro simétrico para frecuencias negativas



(a) Esquema.



(b) Configuración interna del integrado MC1496.

Figura 3: Multiplicador analógico de señales

Para la implementación de dicho modulador, hemos de utilizar el circuito integrado MC1496, es un dispositivo que permite obtener a su salida el producto de dos señales y, por tanto, puede utilizarse como modulador balanceado, mezclador doblemente balanceado, detector coherente, doblador de frecuencia, y cualquier aplicación que haga uso de dicha operación. El esquema circuital interno se muestra en la figura 3(b).

Este dispositivo ofrece una excelente supresión de portadora (más de 50 dB) para frecuencias en torno a 500 kHz como informa la hoja de datos. Esto se logra ajustando un nivel de tensión negativa por medio de un potenciómetro entre los pines de entrada de señal. Para bajas frecuencias de señal, la ganancia en voltaje viene dada por la ecuación (3):

$$A_{vs} = \frac{V_O}{V_m} = \frac{R_L}{R_E + 2r_e} \therefore r_e = \frac{26mV}{15mA} \quad (3)$$

cuando la amplitud de la portadora es de 500 mV (pico). Para una operación lineal del dispositivo es aconsejable que la señal de entrada no tenga un valor de pico superior a:

$$V_m \leq I_5 R_E$$

Además, el MC1496 ha sido optimizado para un valor de corriente $I_5 = 1mA$, lo que se consigue conectando una resistencia de 6,8 k entre la patilla 5 y tierra. Este IC tiene la posibilidad de trabajar tanto con señales diferenciales o no.

2.1.1. Implementación del modulador

En la figura (4) se muestra el circuito práctico para el uso del MC1496 como modulador de amplitud.

En principio se implementó el circuito de la figura (4), tras lo que se le aplicó una portadora senoidal de $500mV_{pp}$ a 100 KHz y una modulante de 10 KHz a $500mV_{pp}$, estas señales se muestran en la figura 5(a). Con esta configuración la señal modulada tiene un índice de modulación del 100 %, lo que implica que las bandas laterales deben tener la mitad de la amplitud de la portadora. El espectro de la señal modulada se ilustra en la figura 5(b), en el mismo se puede comprobar que la modulación efectivamente se realiza al 100 % pues una relación de 1/2 se traduce como -6 dB en la escala logarítmica. En otras palabras las bandas laterales deben estar 6 dB por debajo de la amplitud de la portadora. Esto se observa claramente pues la escala vertical de la FFT es 10 dB/div.

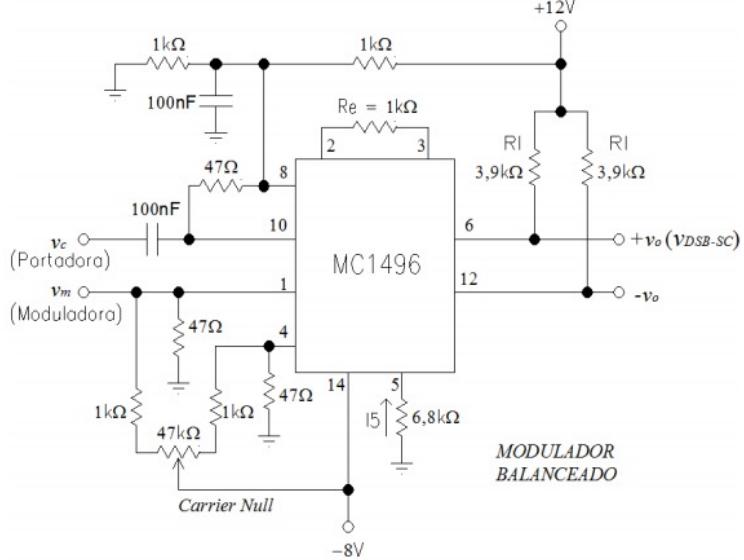
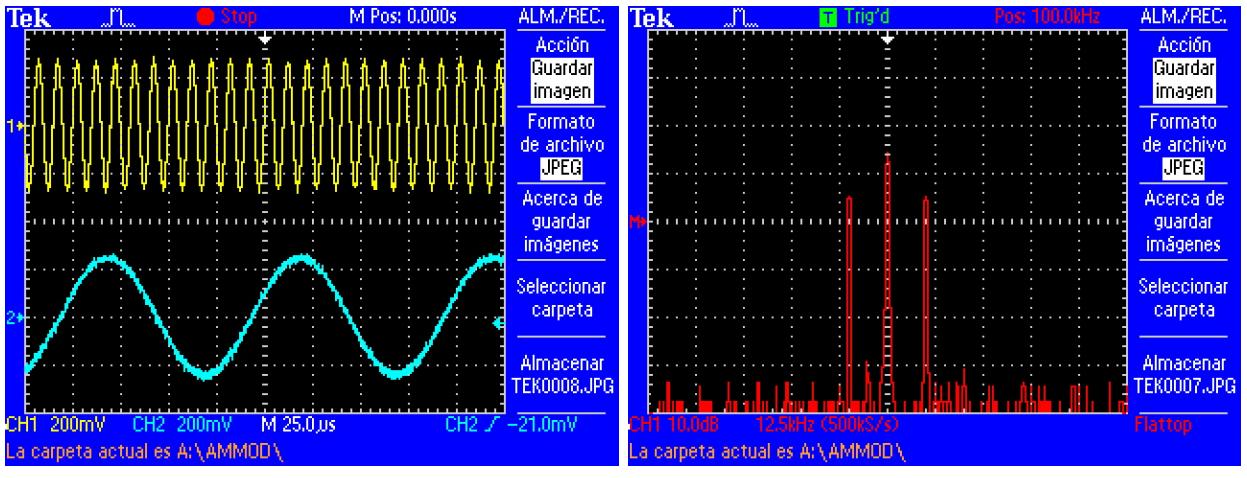


Figura 4: Circuito modulador de AM implementado.



(a) Señales de entrada.

(b) Espectro de AM con $m=100\%$.

Figura 5: Señales en el modulador.

A continuación se ajusta el control horizontal para poder visualizar la segunda armónica producida y evaluar su aporte a la señal obtenida, esto se ilustra en el oscilograma de la figura 6. Si tomamos en cuenta la portadora se observa que la componente a 200 KHz esta aproximadamente 15 dB por debajo de la fundamental.

El siguiente paso es obtener un indice de modulación, para nuestro caso, resultó ser según los valores que se aprecian en la figura (7) de donde se puede extraer:

$$\begin{cases} e_c + e_m = 4,24V \\ e_c - e_m = 960mV \end{cases} \quad (4)$$

de donde se puede resolver el sistema de 2×2 sumando y restando las ecuaciones:

$$2e_c = 5,2V \Leftrightarrow 2e_m = 3,28V$$

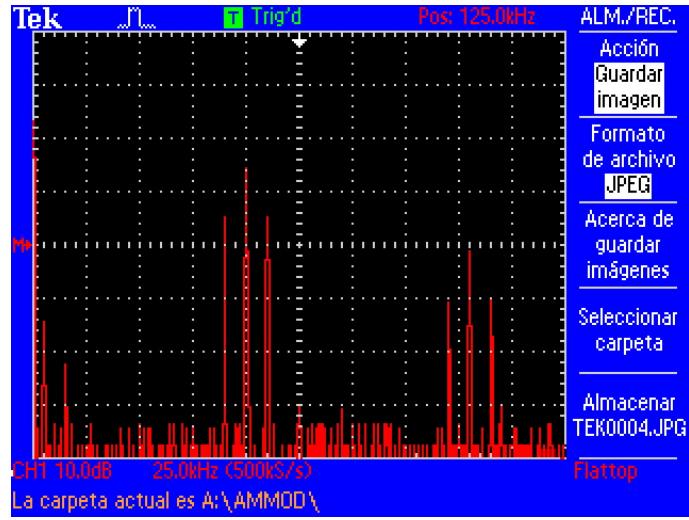


Figura 6: Distorsión producida por el modulador.

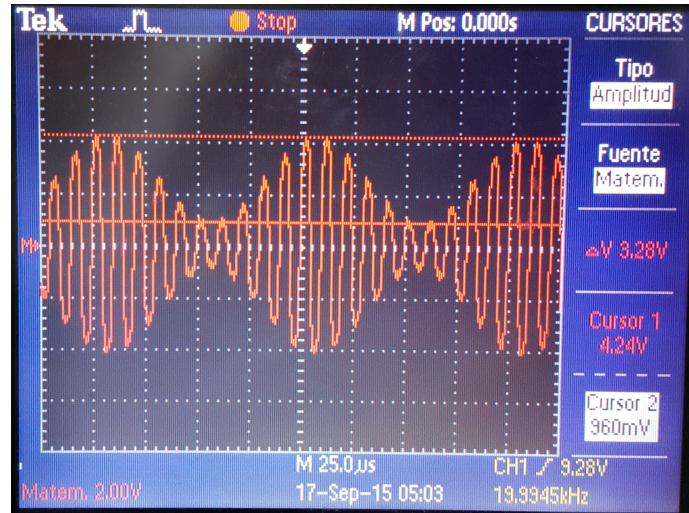


Figura 7: Índice de modulación.

entonces:

$$e_c = 2,6V \Leftrightarrow e_m = 1,64V$$

finalmente:

$$m = \frac{e_m}{e_c} = \frac{1,64V}{2,6V} = 0,6307 \quad (5)$$

Lo que corresponde a un índice de modulación del 63 %. Luego se cambiaron las frecuencias de oscilación de las señales portadora y moduladora a 1 MHz y 100 KHz respectivamente para analizar el comportamiento a frecuencias mayores (en este caso estamos dentro la banda comercial de AM). El espectro de frecuencias se muestra en la figura 8.

Ahora se va a cambiar el tipo de modulación para ello configuramos los generadores para obtener la señal original (de la figura 5(b)) luego observamos la señal a salida del modulador y ajustamos el potenciómetro (carrier null) hasta que dicha señal tuvo la apariencia de ser doble banda lateral con

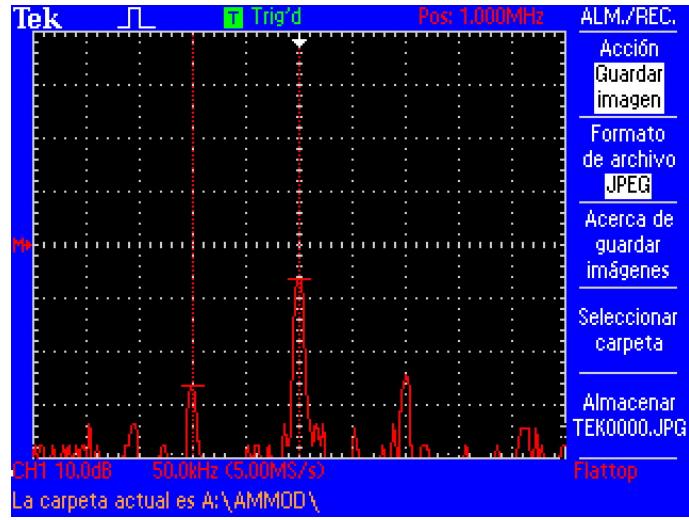
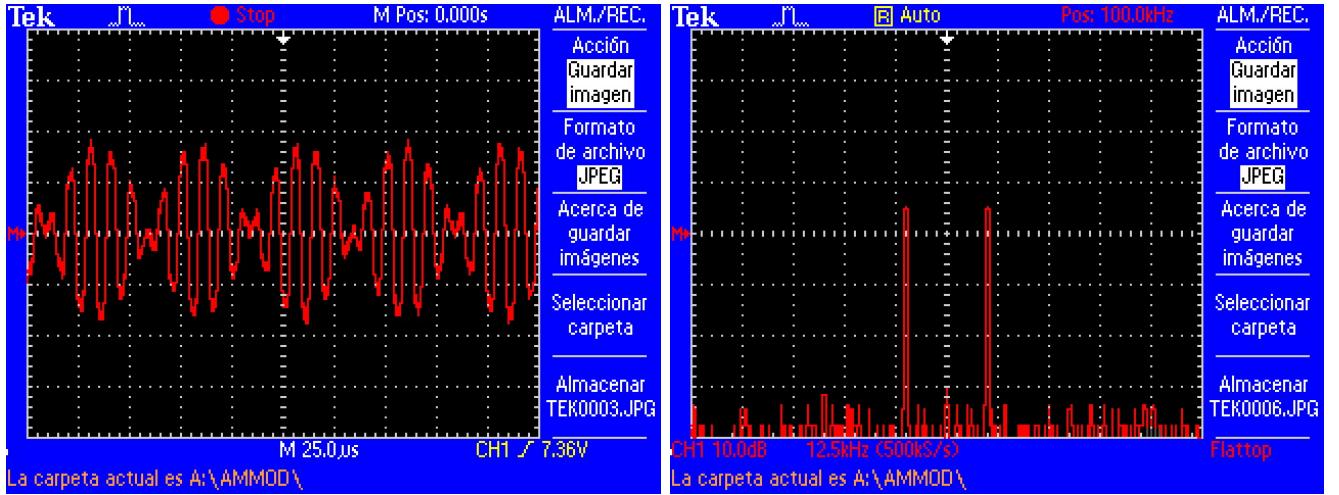


Figura 8: Espectro de frecuencias.

portadora suprimida como se ve en la figura 9(a) (se observan dos envolventes opuestas correspondientes a la moduladora en cuyo interior se encuentra la portadora modulada).



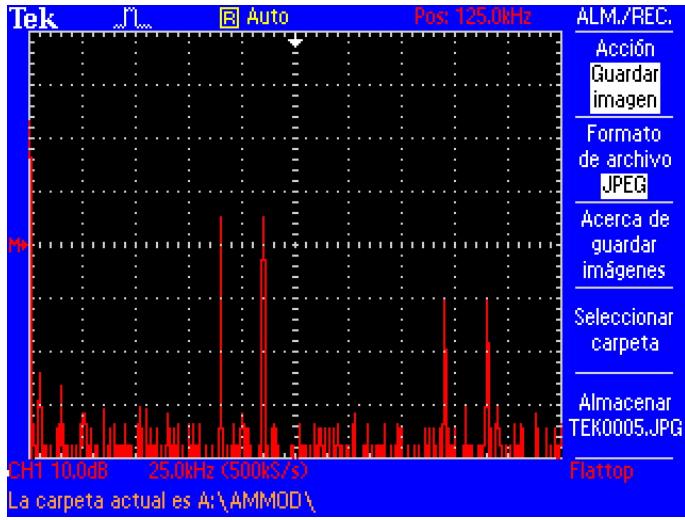
(a) Señal en el tiempo.

(b) Espectro de frecuencias.

Figura 9: Doble banda lateral con portadora suprimida.

Para suprimirla del todo, procedimos a desconectar la señal moduladora y ajustar el potenciómetro hasta que desapareció la señal de salida, luego se conecta nuevamente la banda base. Se ve claramente como la portadora cambia de fase cuando la moduladora cruza por cero la cual es una característica distintiva de esta modulación. En la figura 9(b) se muestra la composición espectral de esta señal, si comparamos las amplitudes de la portadora se ve que ésta ha sido atenuada mas de 40 dB.

Si analizamos que ocurre con la distorsión para este caso puede verse en la figura que las bandas laterales siguen apareciendo en la segunda armónica y la relación de amplitudes se sigue manteniendo (≈ 15 dB).



2.2. Modulación de frecuencia (FM)

En este tipo de modulación la frecuencia de la portadora varía en función de la señal moduladora, esta técnica es una forma de modulación angular debido a que el argumento (ángulo o fase) $\theta(t)$ de la señal portadora está en función de la moduladora $x(t)$:

$$\phi_{FM} = A_C \cos(\theta(t))$$

$$\theta(t) = \omega_C t + f(x(t))$$

En este caso A_C es una constante. Resulta útil recordar que la frecuencia de la portadora $\omega(t)$ es la derivada de la fase ($\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$). Existe una gran cantidad de formas de hacer variar la frecuencia en función de la señal $x(t)$, pero pueden diferenciarse dos formas principales de producir la señal ϕ_{FM}

- Si la frecuencia depende linealmente de la señal moduladora se denomina FM directa. Es decir:

$$\omega(t) = \omega_C + k_f x(t) \implies \theta(t) = \omega_C t + k_f \int_0^t x(t') dt' + \theta_0$$

- Si la fase depende linealmente de la modulante se denomina FM indirecta o modulación de fase (PM), o sea:

$$\theta(t) = \omega_C t + k_p x(t) + \theta_0 \implies \omega(t) = \omega_C + k_p \frac{dx(t)}{dt}$$

donde k_f , k_p , θ_0 son constantes. Como puede verse hay una estrecha relación entre las modulaciones de frecuencia y fase. En el primer caso la frecuencia varía de forma lineal con la moduladora y la fase cambia con la *integral* de la modulante. En el segundo caso la frecuencia varía con la *derivada* de la banda base, esto quiere decir que se puede obtener la ϕ_{FM} si se integra $x(t)$ y luego se modula en fase una portadora senoidal, de este procedimiento surge el término “indirecto”. En la figura 10 puede apreciarse estas relaciones para una banda base senoidal. En la misma se aprecia que las ondas de FM y PM en principio tienen la misma forma pero desplazada en el tiempo, esta característica viene dada por la relación (de integral o derivada) entre ambas.

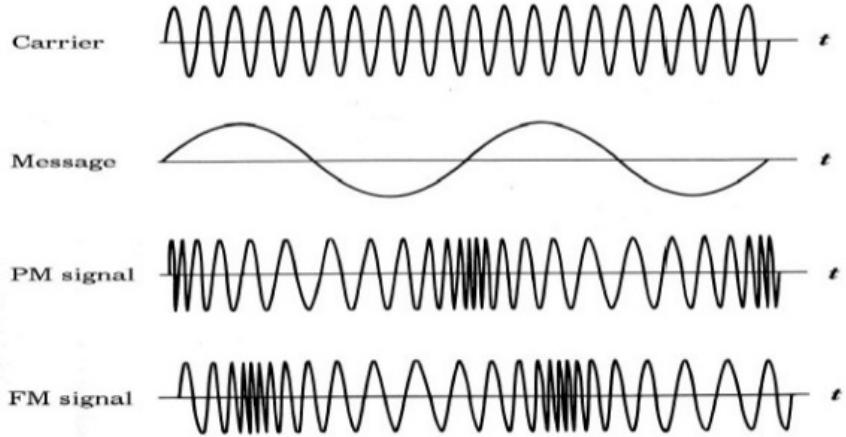


Figura 10: Señales de FM y PM.

2.2.1. Circuito Modulador

Para la implementación se eligió un circuito que realiza la modulación directa de frecuencia evitando el uso de circuitos integradores y de otro tipo. El esquema circuital se muestra en la figura 11 donde se reemplaza el capacitor $C4$ por un diodo varicap BB105 polarizado en inversa. Este diodo es el elemento encargado de variar la frecuencia de oscilación en función de la capacidad de juntura que posee. El circuito presentado básicamente autopolariza el transistor BF199 para fijar los niveles de tensión y corriente a la salida que vienen dados por el circuito tanque visto desde los terminales de Colector y Emisor.

En el punto con la etiqueta **MOD_in** es la entrada de la señal modulante, se emplea una red de adaptación (filtro) para reducir la influencia de señales indeseadas. En el cátodo del varicap (punto de conexión entre $C2$ y $C4$) debe existir una tensión que lo polarice fijando así la capacidad y, en consecuencia, la frecuencia de oscilación del circuito cuando no se presente señal. Esto se logra con un potenciómetro **POT1** conectado entre fuente y masa, el cursor se conecta a través de una resistencia para evitar que el diodo quede directamente a los niveles extremos de la fuente, por último se añade un capacitor para eliminar el ruido proveniente de la fuente de alimentación. En el mismo punto también se monta la señal moduladora pues los cambios en el nivel de ésta hacen que la capacitancia del diodo cambie y por ende la frecuencia de oscilación.

Para la implementación del circuito se usan resistencias de metalfilm con tolerancia del 1 %. Los capacitores son de mica-plate con excepción de los electrolíticos y el inductor se fabricó usando 4 vueltas de alambre de cobre AWG 21 en un núcleo de aire de 8 mm de diámetro. El transistor BF 199 tiene un encapsulado TO92 plástico, el circuito se montó en una placa de fibra de vidrio simple faz.

A continuación se emplea el software de simulación QUCS para observar el comportamiento de las diferentes partes del modulador y realizar los cambios que sean necesarios para implementar el circuito².

Circuito oscilador

Se trata del circuito en ausencia de señal moduladora, para este tipo de simulación puede esperarse ver el nivel de señal a la salida y la frecuencia de oscilación “libre”. La disposición de los elementos

²Se emplea un capacitor en lugar del varicap debido a la falta del componente en el programa

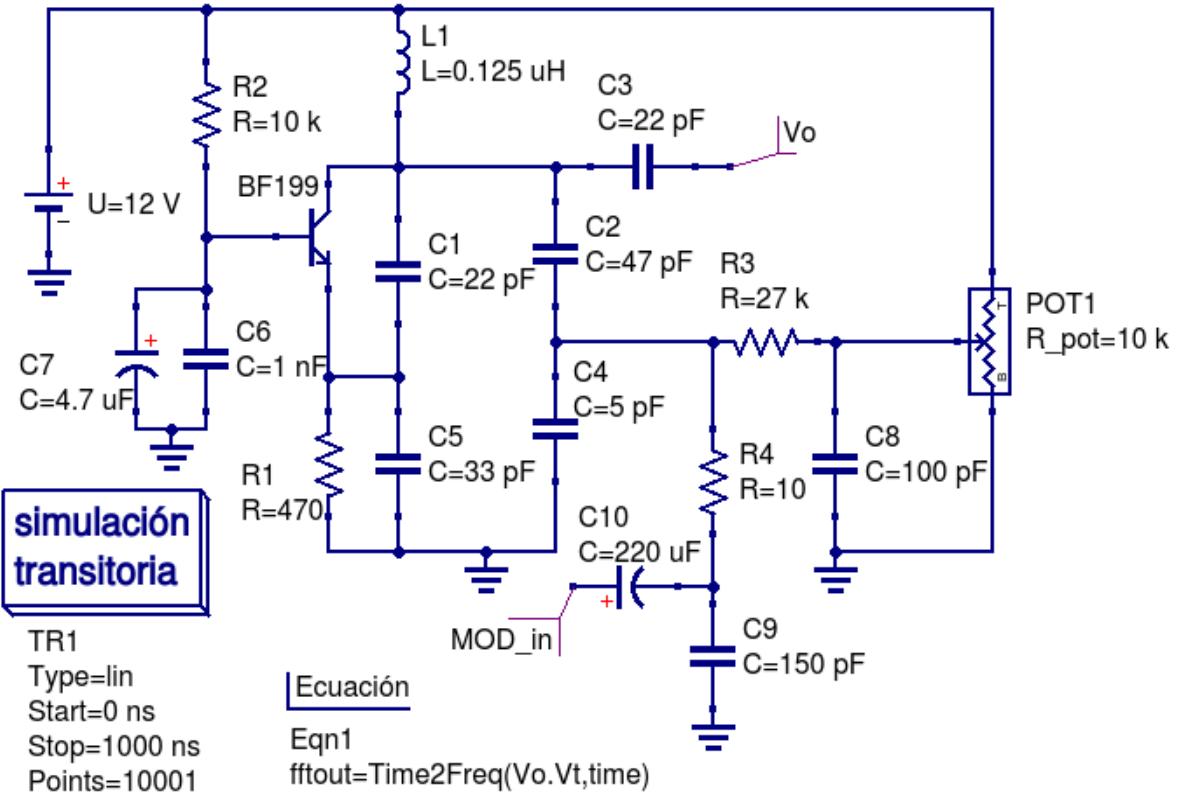


Figura 11: Esquemático del circuito empleado.

y ajustes de simulación se observan en la figura 12.

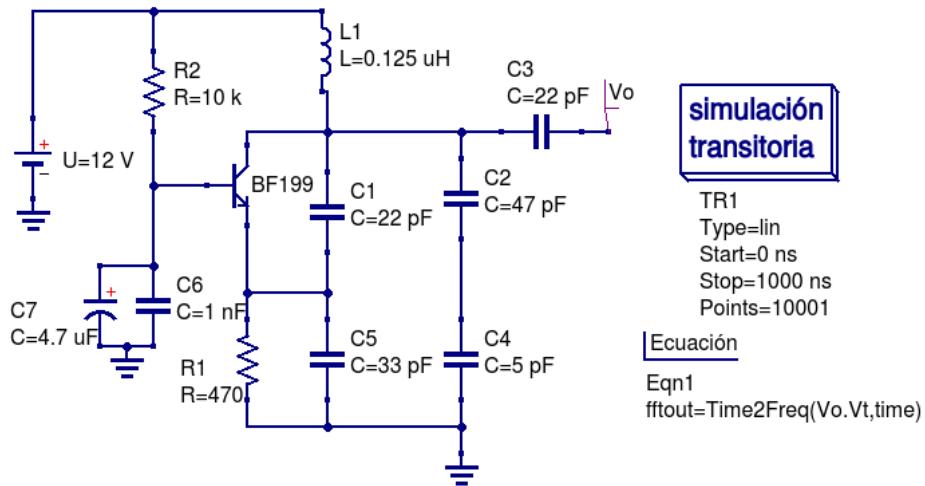


Figura 12: Simulación del oscilador para FM.

Como resultado se obtiene las gráficas de la figura 13 en la frecuencia y tiempo, en las mismas se puede observar que luego de un determinado tiempo las oscilaciones se mantienen de forma periódica en el tiempo con una pequeña deformación en parte del semicírculo negativo. En el dominio de la

frecuencia se destaca la componente principal de la señal a unos 90 MHz seguida de sus armónicas, la primera de las cuales tiene una amplitud significativa.

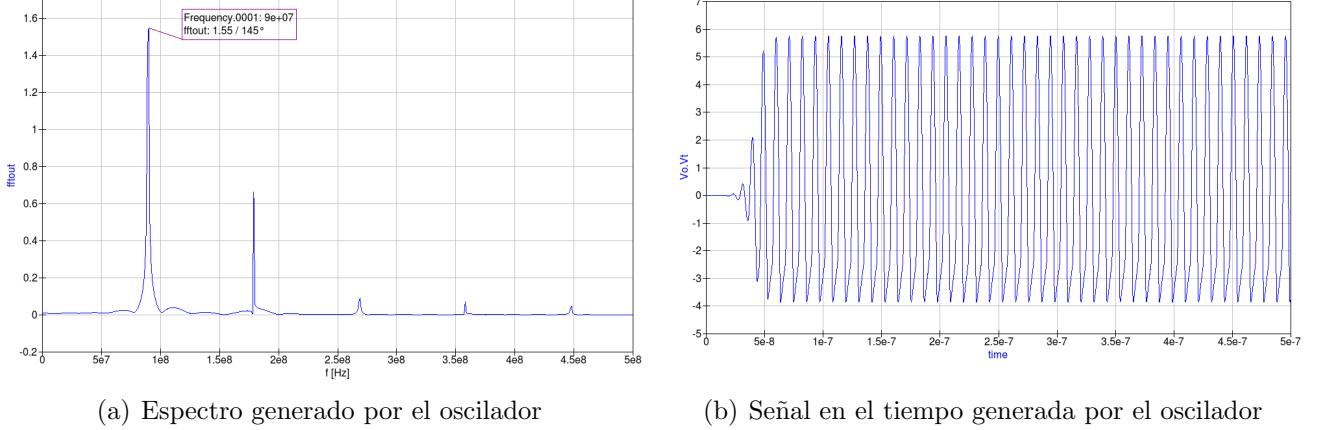


Figura 13: Medición en el punto Vo de la figura 12.

Circuito de preénfasis

Es el circuito encargado de dejar pasar las señales de la moduladora y bloquear las provenientes del oscilador se muestra en la figura 14. Este circuito se ensaya empleando la herramienta de simulación de parámetros S del software y graficando el parámetro de transferencia directa S_{21}

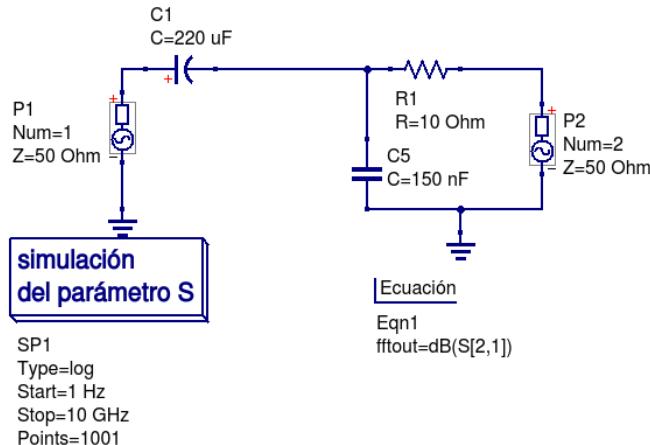


Figura 14: Simulación de la red de preénfasis.

Como resultado se obtiene lo mostrado en la figura 15 donde la señal en azul es el módulo del parámetro mientras que la roja esta expresa el mismo parámetro en decibeles. A partir de la misma se puede concluir que este circuito se comporta como un filtro pasa bandas el cual permite el paso de señales con frecuencias comprendidas entre 8 Hz y 30 KHz.

Es importante aclarar que no se debe permitir el paso de continua porque se suma al nivel con el cual se desea polarizar el varicap haciendo que la frecuencia de oscilación sufra un corrimiento indeseado. Por otro lado es evidente que no se desea que las altas frecuencias atraviesen esta red hacia la fuente generadora de la modulante.

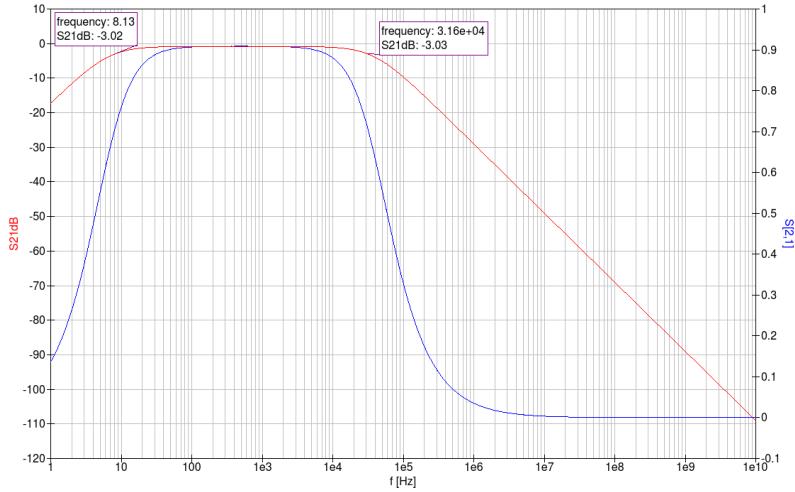


Figura 15: Respuesta en frecuencia de la red.

Para obtener un mejor nivel de señal en la carga (el objetivo es disipar en la carga un mínimo de 5 mW) se acopla a la salida del oscilador un amplificador clase A para señal pequeña basado en un transistor NPN BF199 (el mismo que se emplea en el oscilador) polarizado con divisor resistivo y bobina de choke. El circuito se muestra en la figura 16 el acoplamiento con la carga se hace por medio de un capacitor de 22 pF.

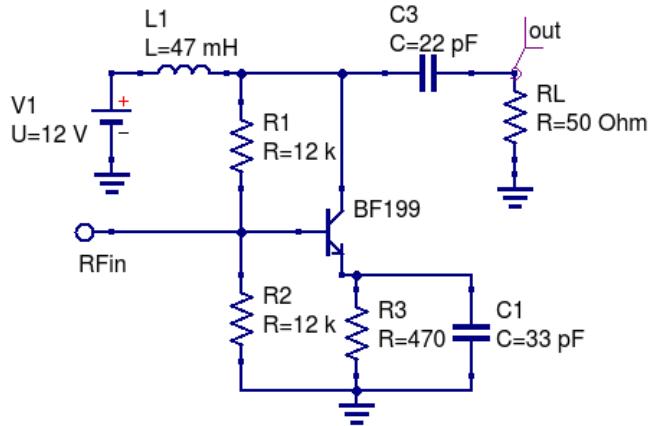
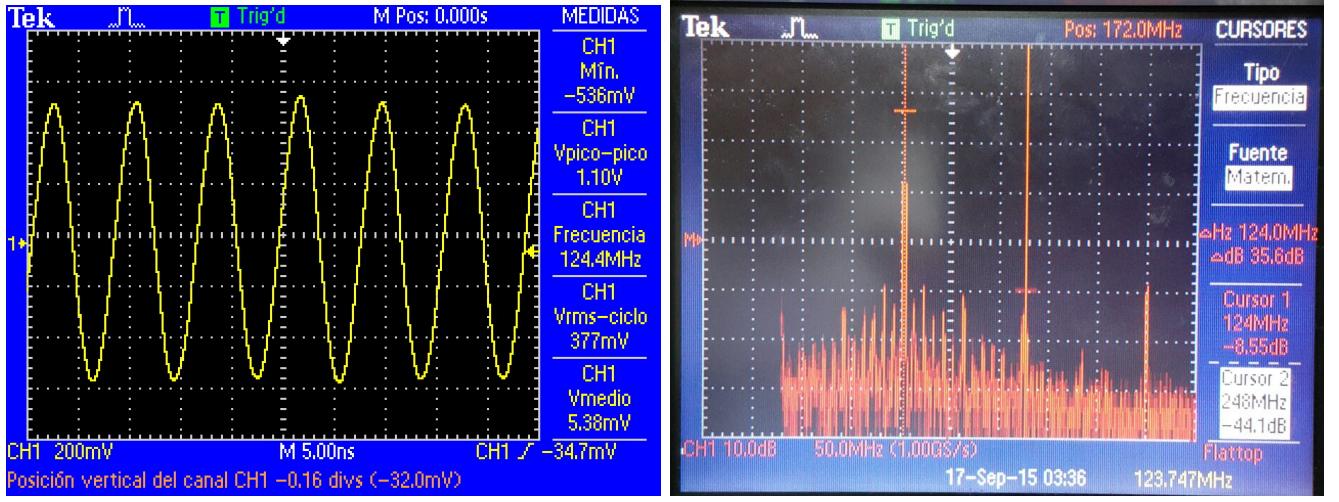


Figura 16: Esquemático del amplificador.

2.2.2. Mediciones

Para llevar a cabo los ensayos sobre el circuito propuesto se empleó el osciloscopio Tektronix TDS 2022B el cual posee un ancho de banda de 200 MHz y 2 Gs/s con puntas con un ancho de banda apropiado. Es importante aclarar que los ensayos se realizan con el circuito cargado pues de lo contrario la influencia de las impedancias de la punta y de entrada del osciloscopio influyen en el circuito sintonizado (tanque) del oscilador produciendo cambios de frecuencia y niveles de amplitud.

En la figura 17(a) se observa la forma de onda en la carga mientras que en la figura 17(b) se puede apreciar el contenido espectral de la señal.



(a) Señal en el tiempo.

(b) Espectro de frecuencias.

Figura 17: Mediciones en el oscilador.

A partir de estas imágenes se pueden realizar las siguientes mediciones:

- $V_{RMS} = 377 \text{ mV}$
- $f = 124 \text{ MHz}$
- $P_O = \frac{V_{RMS}^2}{R_L} = \frac{(377 \text{ mV})^2}{50 \Omega} = 2,84 \text{ mW}$

Por otro lado es oportuno mencionar que la segunda armónica se encuentra 35.6 dB por debajo de la portadora, es decir 35.6 dBc. Como el osciloscopio realiza esta medición en decibeles referidos a 1V RMS se calcula a continuación el nivel de la componente a 248 MHz.

$$V_{2f}|_{dBV} = V_f|_{dBV} - 35,6 \text{ dB} = -44,1 \text{ dBV}$$

$$V_{2f}|_{VRMS} = 1V \times 10^{\frac{-44,1}{20}} = 6,27 \text{ mVRMS}$$

Como puede notarse en las mediciones realizadas la implementación del circuito los valores para la frecuencia y niveles de tensión difieren de lo simulado previamente, esto se debe principalmente a las tolerancias de los componentes empleados, por ejemplo al medir la inductancia de la bobina confeccionada el instrumento LCR arrojo que la misma posee un valor de aproximadamente 200 nH (a 1 KHz). Por otro lado en el diseño del circuito impreso se procuró llenar las zonas libres conectándolas a masa para minimizar la influencia de ruido propio o externo, esto puede observarse en el espectro de la figura 17(b) donde las oscilaciones a frecuencias indeseadas alcanzan como máximo el 2 % del valor RMS de nuestra portadora.

Al conectar la señal modulante se obtuvo lo mostrado en la figura 18. Esta señal evidentemente no se corresponde con la modulación en frecuencia deseada, una de las posibles causas de este efecto puede ser el nivel de señal a la entrada pero al ajustarlo manualmente no se observó ningún cambio significativo. Otra opción puede ser que el diodo varactor no sea el requerido para construir el

circuito, no es posible corroborar esto por inspección debido a que el elemento no posee ningún tipo de identificación salvo la marca de polaridad, esto también podría ser la causa de que la frecuencia de oscilación difiera tanto de la simulada. En el momento de los ensayos no fue posible realizar la comprobación del dispositivo.

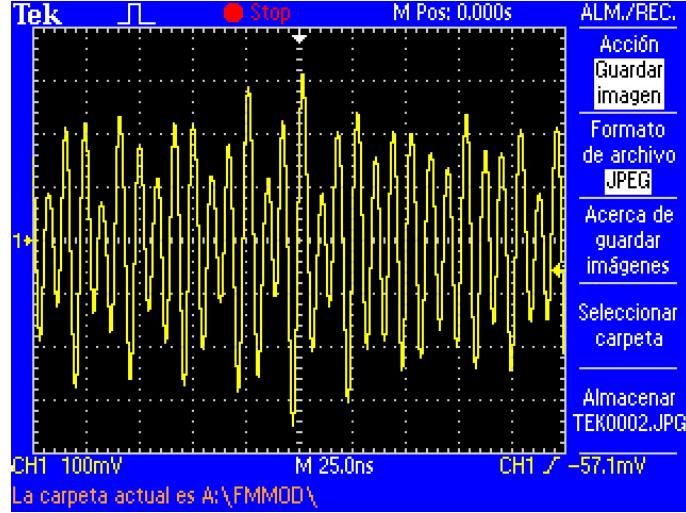


Figura 18: Señal con banda base presente.

3. Simulación de modulaciones digitales

En esta etapa del trabajo práctico se dispone del simulador QUCS para ensayar diferentes sistemas de modulación/demodulación (MODEM). Se utilizan componentes de la librería IDEAL para construir los bloques de transmisión y recepción.

3.1. Amplitude Shift Keying (ASK)

La modulación por desplazamiento de amplitud esta contenida en el conjunto de técnicas de modulación donde la portadora es analógica y la banda base es digital. Básicamente la modulación se logra asignando un nivel de amplitud en Voltios a los estados lógicos 0 y 1 o a un conjunto de estos (agrupando M bits se obtiene la técnica multinivel M-ASK). En el presente práctico se asignan las amplitudes 0V y 1V para los estados 0 y 1 respectivamente, en particular este tipo de modulación se denomina *on-off keying*, OOK. Matemáticamente la señal modulada ϕ_{ASK} puede expresarse como:

$$\phi_{ASK} = \begin{cases} \sin(\omega t) & \text{si } x(t) = 1 \\ 0 & \text{si } x(t) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

donde $x(t)$ es la banda base. El esquema del sistema de modulación/demodulación se muestra en la figura 19

El modulador se compone de los generadores de portadora y banda base, para obtener la señal de ASK se multiplican directamente empleando un circuito apropiado, en el esquema se emplea el símbolo de multiplicador analógico, en la práctica a partir de este punto se emplean amplificadores para aumentar la potencia de la señal y circuitos de adaptación para realizar la conexión apropiadas

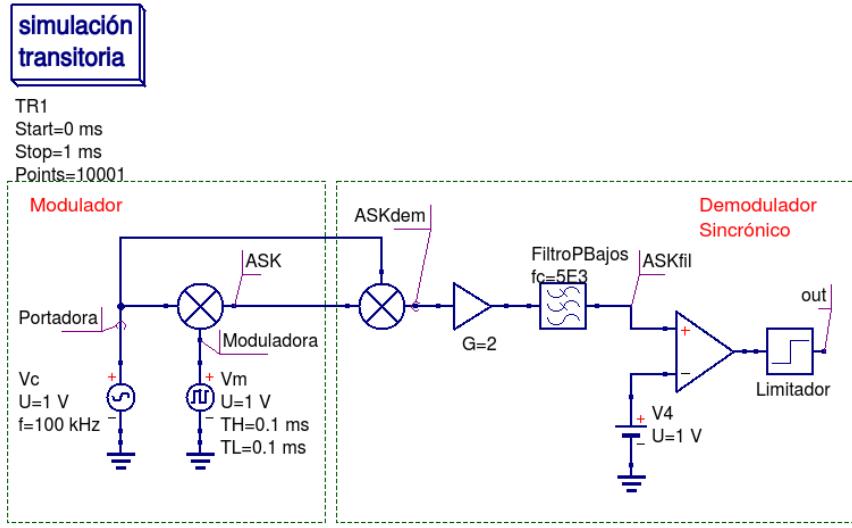


Figura 19: Diagrama en bloques del sistema ASK.

entre etapas y hacia la antena. En las figuras 20(a), 20(b) y 20(c) se muestran las señales moduladora, portadora y modulada respectivamente. Claramente se observa la presencia de la portadora cuando en la banda base hay un 1 y no hay señal cuando la banda base presenta un 0.

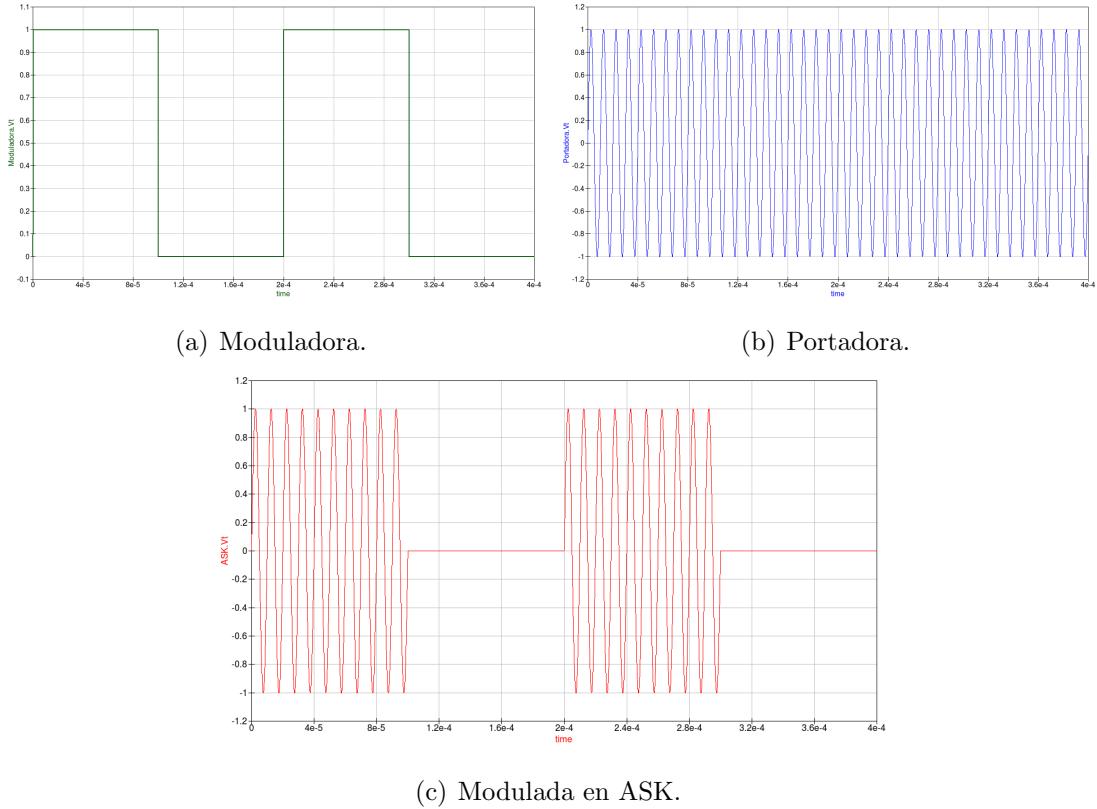


Figura 20: Señales en el modulador.

La demodulación se realiza de forma sincrónica (por reinyección de portadora), es decir se mul-

tiplica la señal de ASK por un tono de igual frecuencia y fase que la portadora. Para lograr esto se usan circuitos de recuperación de portadora empleando PLL o circuitos similares. En el caso de nuestra simulación tomamos la señal de la misma fuente portadora. Como resultado de este producto se obtiene la señal mostrada en la figura 21(a) . Aquí la frecuencia de oscilación es el doble de la portadora.

A continuación la señal es amplificada para obtener un mejor nivel, luego se emplea un filtro pasa bajos para eliminar las componentes mayores a la frecuencia de la banda base. Como resultado se puede ver en la figura 21(b) que en la salida se tiene presente un nivel de continua mas un tono a la frecuencia de la modulante.

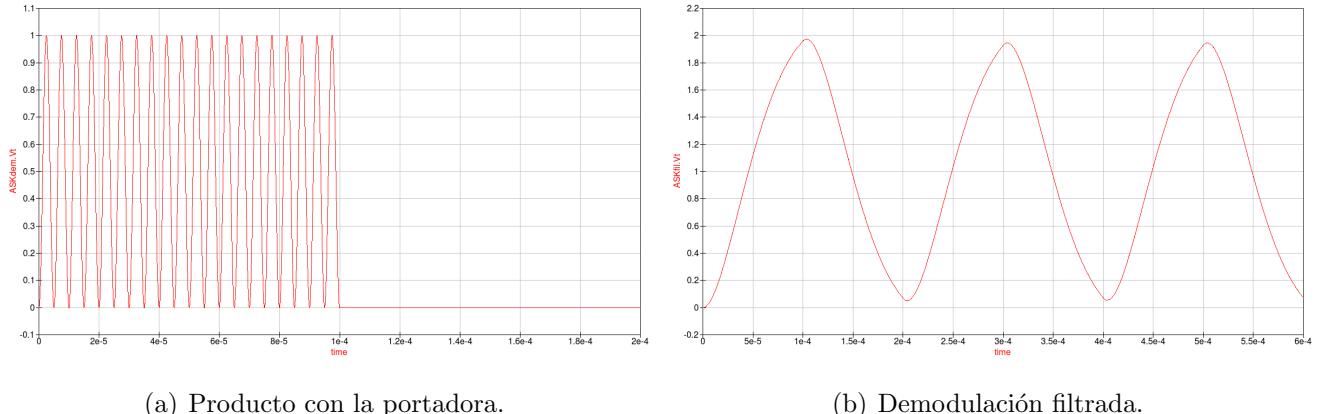


Figura 21: Señales en el demodulador.

Por último se compara esta señal con un nivel de continua para reconstruir la señal digital usando un limitador de tensión para ajustar los niveles de tensión a los de la lógica digital. La señal de salida junto a la banda base se muestran en la figura 22, se observa una diferencia de fase entre las señales de entrada y salida, la misma se produce por el desplazamiento (offset) de la señal de alterna por parte de la continua.

En el caso de la demodulación asincrónica o no coherente (cuyo esquema se muestra en la figura 23) no es necesario un circuito de recuperación de portadora. Se emplea un diodo detector para rectificar la señal de ASK luego se amplifica y se filtra para obtener la señal a la frecuencia de la modulante, luego un comparador y limitador al igual que la detección sincrónica se encargan de ajustar los niveles.

Las señales en el proceso de modulación son exactamente las mismas que en el sistema anterior. La señal rectificada puede observarse en la figura 24(a), puede notarse que el nivel de pico de esta onda es bajo debido a la caída de tensión del diodo que se encuentra conectado en serie con la impedancia de entrada del amplificador. En el caso de la figura 24(b) la señal rectificada se ha filtrado por lo que se observa el tono a frecuencia de la moduladora además de un offset.

En la figura 25 puede verse claramente que el período de la señal obtenida es de 0.2 ms que es igual a la suma de los tiempos TH y TL ajustados en la fuente modulante, por lo tanto podemos concluir que se ha recuperado la banda base. De igual forma que la detección coherente se produce un desplazamiento de fase entre las señal original y recuperada. Debe aclararse que la escala de la modulante es distinta pues se encuentra codificada.

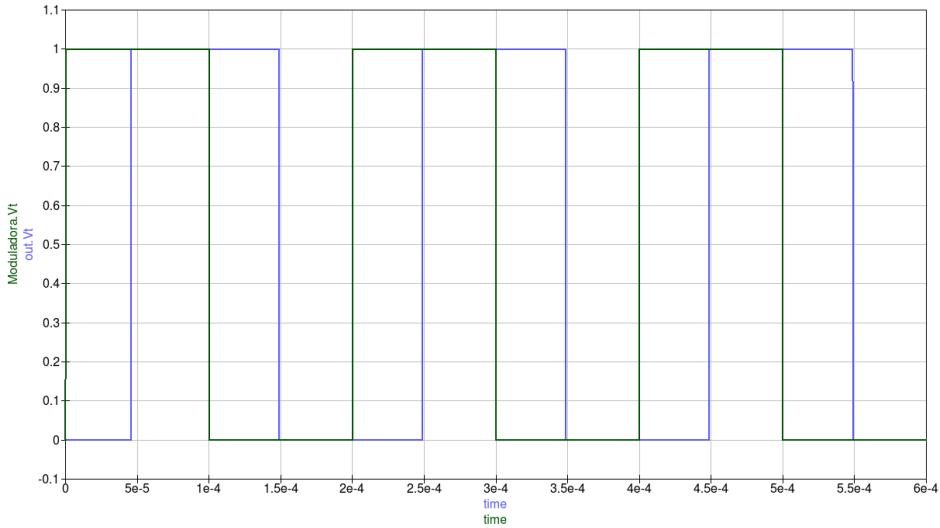


Figura 22: Comparación de las señales de entrada y salida.

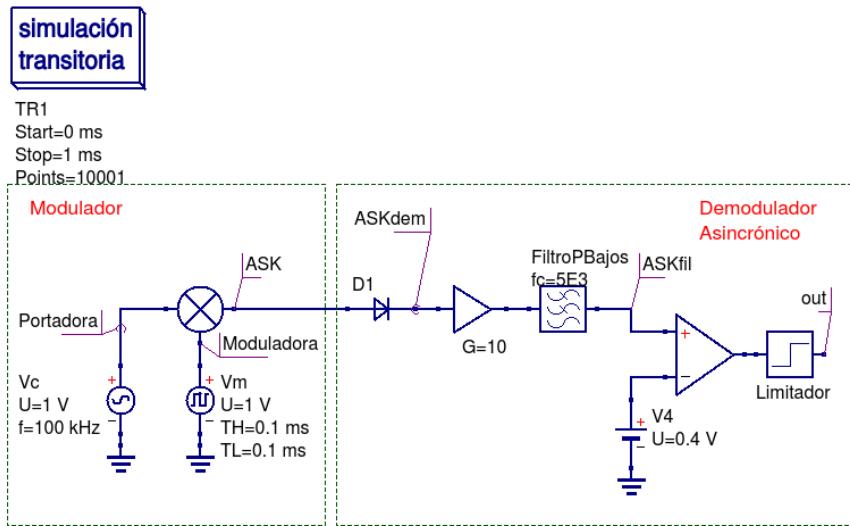


Figura 23: Transmisión ASK con detección no coherente.

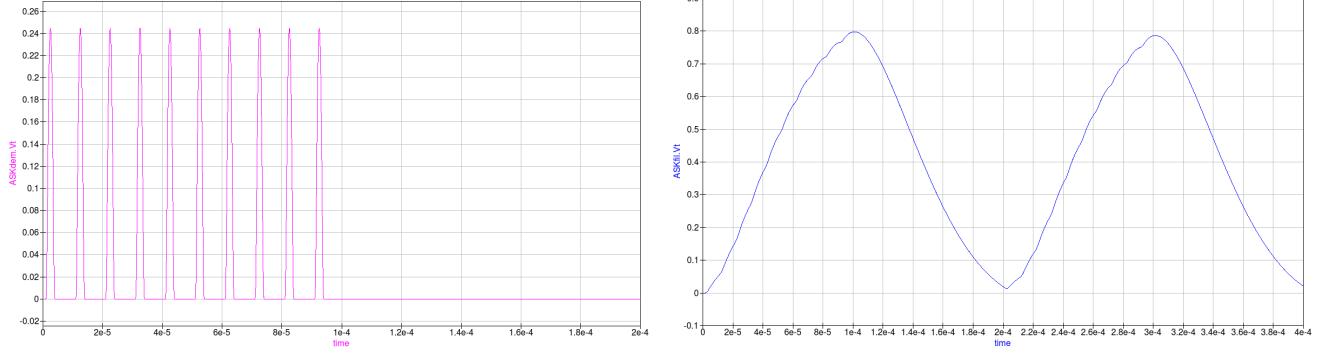
3.2. Modulación por desplazamiento de fase (PSK)

Con esta modulación son posibles dos fases para la misma frecuencia. La fase 0° grados representa un uno (**1 lógico**), mientras que la fase 180° representa el **cero (0)** lógico. Una forma de expresar matemáticamente la señal modulada ϕ_{PSK} es la siguiente:

$$\phi_{PSK} = \begin{cases} \sin(\omega t) & \text{si } x(t) = 1 \\ \sin(\omega t - \pi) & \text{si } x(t) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

para una señal modulante $x(t)$. La expresión (7) puede simplificarse si se tiene en cuenta que $\sin(\omega t - \pi) = -\sin(\omega t)$, por lo que finalmente se expresa:

$$\phi_{PSK} = \begin{cases} \sin(\omega t) & \text{si } x(t) = 1 \\ -\sin(\omega t) & \text{si } x(t) = 0 \end{cases} \quad (8)$$



(a) ASK rectificada.

(b) Demodulación amplificada y filtrada.

Figura 24: Señales en el demodulador.

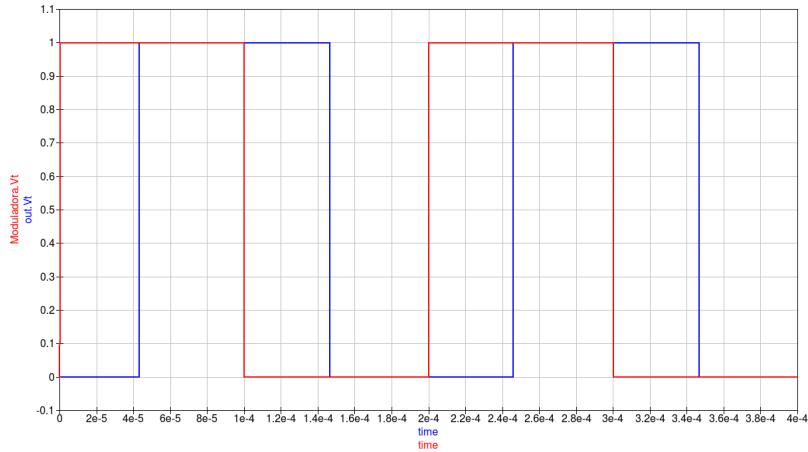


Figura 25: Comparación entre las señales de entrada y recuperada.

Entonces esta señal se puede construir multiplicando la portadora por una señal que alterne entre los valores -1 y 1. Esto se puede lograr empleando un tipo de codificación especial llamada NRZ³ bipolar, un ejemplo del funcionamiento de este tipo de codificación se muestra en la figura 26. Se observa que la señal codificada respeta los tiempos en alto y bajo pero la amplitud pico-pico de la señal es el doble de la original.

Una forma simple de lograr esta codificación a partir de nuestra moduladora $x(t)$ es amplificar x por 2 y luego darle un offset de -1V.

Puede verse en la figura 27 que el modulador consta de una estructura muy básica, donde intervienen un multiplicador, una portadora senoidal y una señal modulante construida como se explicó anteriormente.

Para ello se simula a la información codificada con una señal cuadrada con un duty cycle del %50 sin offset (tiene valores positivos y negativos) con una frecuencia de 10 KHz. La portadora senoidal con amplitud de 1 V y frecuencia de 100 KHz se muestra en la figura 28(b). La salida de este módulo puede observarse en la figura (28(c)).

Por otra parte, el demodulador empleado, está configurado para detección coherente. Esta es

³ proviene de Non Return to Zero



Figura 26: Codificación NRZ, esquema.

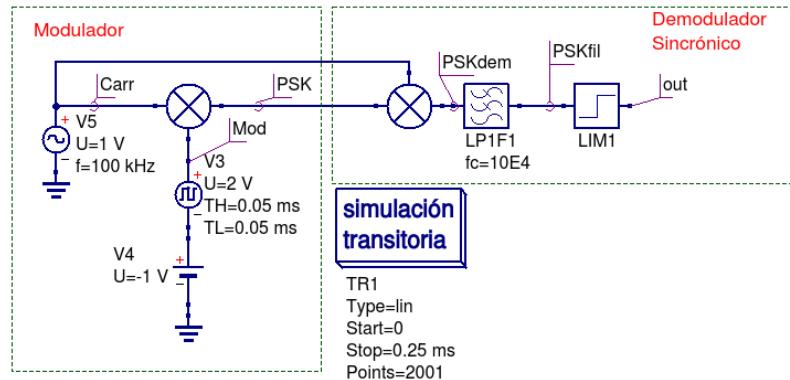


Figura 27: Modulacion PSK, esquema.

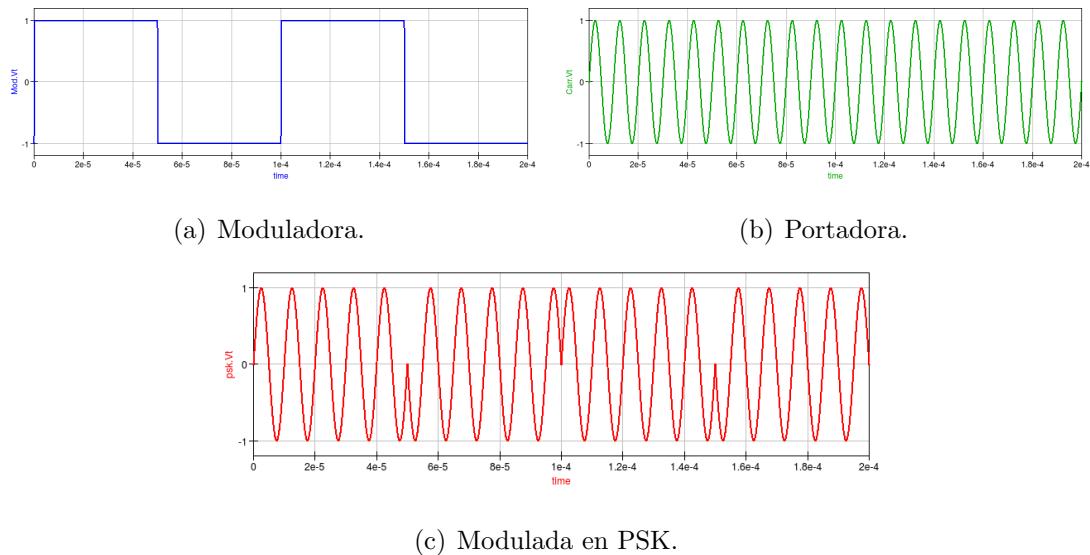
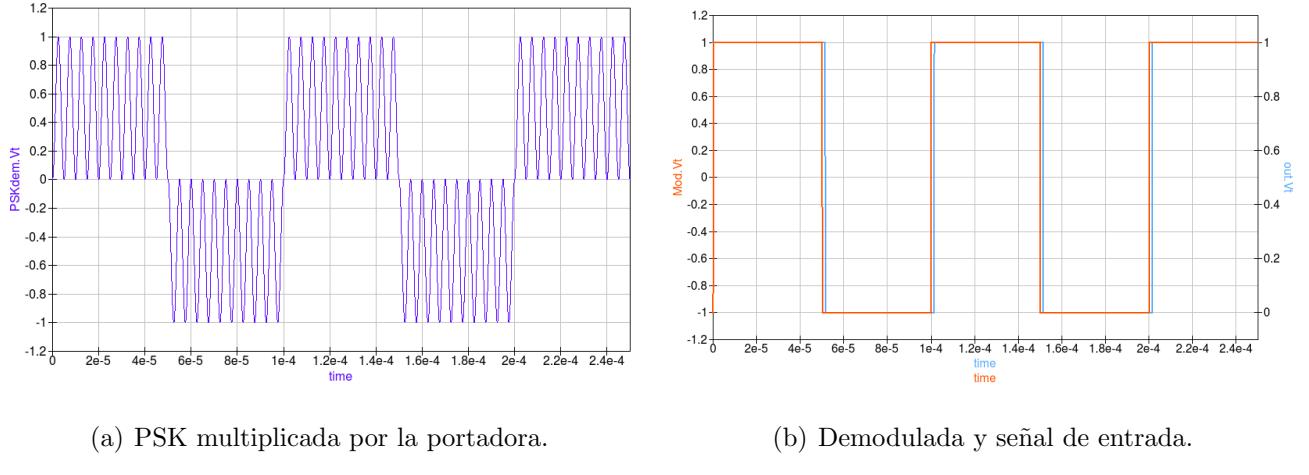


Figura 28: Señales en el modulador.

la única que esta transmisión admite, ya que si se quisiera aplicar detección por envuelta, solo se lograría un nivel de continua. El problema en la detección sincrónica es, en esta técnica, que la portadora transmitida varia la fase y que de esta manera no es posible ajustar el oscilador local en fase y frecuencia de referencia. para subsanar esta dificultad se aprovecha la segunda armónica en de la señal modulada, que esta en fase con la portadora original. Esto significa que a la señal captada, se la multiplica nuevamente por la portadora (este proceso se muestra en la figura 29(a)), que no es la original sino una de las armónicas constitutivas de la señal transmitida procesada para tales fines, para luego de filtrarla y finalmente pasarla por un detector de nivel, que devolverá la señal modulante. Esta señal puede apreciarse en la figura (29(b)).



(a) PSK multiplicada por la portadora.

(b) Demodulada y señal de entrada.

Figura 29: Señales en el demodulador.

Como en los casos anteriores existe una diferencia de fase entre las señal original y la recuperada.

3.2.1. Quadrature Phase shift keying (QPSK)

Si en la banda base se agrupan los bits en duplas (di-bits) por medio de un conversor serie a paralelo y se agrega un retardo al primer bit para que estén al mismo tiempo se obtienen dos bandas base, una que contiene los bits pares y la otra los nones. Cada una de estas señales se emplea para modular en PSK a dos portadoras desfasadas 90° , es decir, una modula una señal coseno a la que se denomina I (de *In phase*) mientras que la restante se multiplica por una sinusoidal, llamada Q (por *Quadrature*).

Estas señales se suman algebraicamente para luego ser transmitidas. La señal modulada ϕ_{QPSK} cambia en función de las 4 palabras de modulación como se expresa en la ecuación (9). Esta técnica también suele llamarse 4PSK o 4QAM.

$$\phi_{QPSK} = \begin{cases} -\cos(\omega_C t) - \sin(\omega_C t) & dabit = 00 \\ -\cos(\omega_C t) + \sin(\omega_C t) & dabit = 01 \\ +\cos(\omega_C t) - \sin(\omega_C t) & dabit = 10 \\ +\cos(\omega_C t) + \sin(\omega_C t) & dabit = 11 \end{cases} \quad (9)$$

La definición anterior puede escribirse como un único tono con una amplitud de $\sqrt{2}$ a la frecuencia ω_C con un desfasaje dado por la combinación de I y Q.

En la figura 30 se muestra la disposición de los bloques usados para elaborar el sistema MODEM para QPSK. Por simplicidad se emplean las fuentes como en PSK cambiando la frecuencia de una

por el doble de la otra para generar la tabla de verdad (esto simula la conversión serie-paralelo y codificación NRZ bipolar) y así observar los cambios de fase durante la simulación. Las salidas correspondientes a los bits pares e impares se muestran en la figura 31(a).

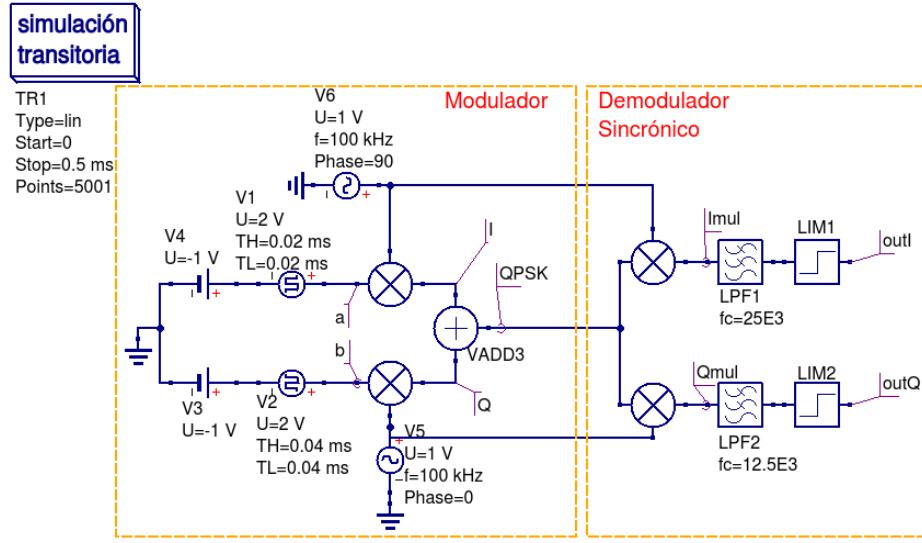


Figura 30: Sistema de comunicación QPSK.

Las modulaciones QPSK producidas por las señales a y b se muestran en la figura 31(b), se observa claramente como las fases de la señales seno y coseno cambian al producirse los flancos en cada portadora.

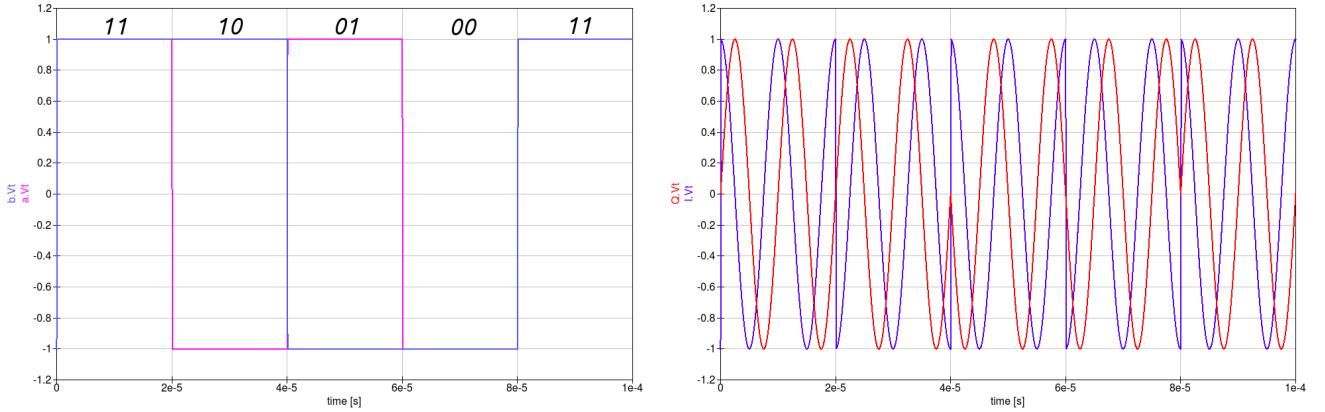
En la gráfica de la figura 31(c) se aprecia la salida del sumador (Señal QPSK), aquí la señal senoidal inicia con un desfasaje de 45° producido por la presencia del díbit 11 y luego va cambiando de acuerdo a los cambios en las señales modulantes.

Al tratarse básicamente de una modulación PSK el tipo de detección va a ser síncrona por lo que se debe recuperar la portadora y por medio de un splitter⁴ separar la entrada en partes iguales para realizar la mezcla de manera similar a como se realizó en el modulador, es decir, multiplicando por un seno y coseno. En la figura 32 se muestra la salida de los multiplicadores, o sea luego de realizar la operación descrita anteriormente.

En 32(a) la señal resultante es un tono en segunda armónica el cual tiene un valor determinado de continua y fase en el tiempo de bit correspondiente al estado bajo o alto. Es importante notar que la fase no siempre es la misma para estos estados pues depende del otro bit presente en la señal de entrada. De igual forma se observa en 32(b) que esta compuesta por una senoidal en segunda armónica ademas del nivel de continua y fase correspondiente. Aquí los cambios de fase y nivel de continua no siempre son simultáneos pues debe recordarse que esta señal tiene la mitad de frecuencia que el anterior por lo que el tiempo de bit es el doble que para la señal en fase. Esto último debe tenerse en cuenta a la hora de implementar los filtros pasa bajos y obtener la señal deseada.

En la figura se muestran la salida del limitador que se encarga de justar los niveles de tensión que se obtienen a partir del filtro. Se realiza la comparación con la señal original codificada. Se observa que el primer bit tarda un tiempo mas en cambiar pero luego las duraciones de los estados alto y bajo son los correctos, como siempre la señal de salida presenta un desfasaje respecto de la entrada.

⁴En esencia se trata de un derivador o repartidor de potencia el cual se emplea para alimentar una señal a diferentes

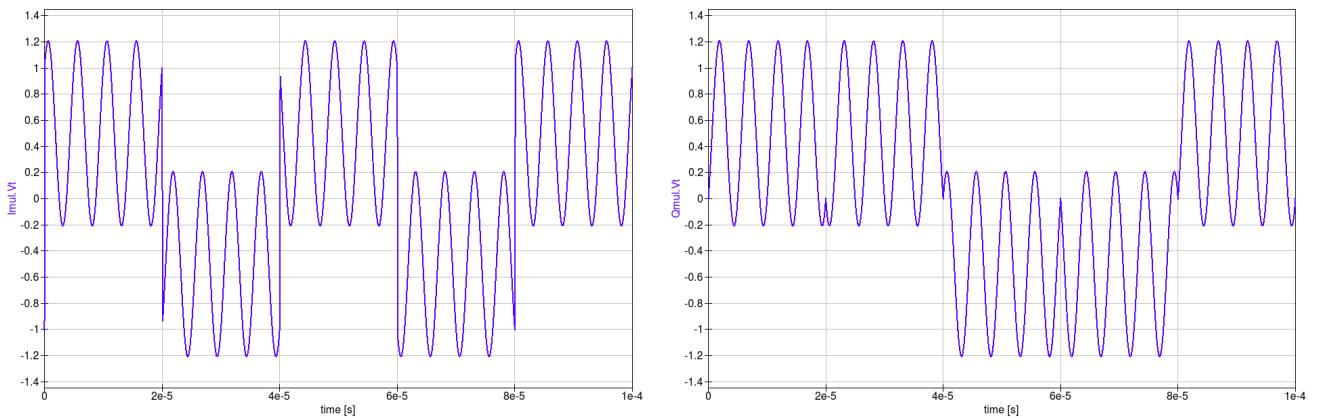


(a) Modulante pasada de serie a paralelo.

(b) Modulación QPSK para cada portadora.

(c) Señal modulada.

Figura 31: Señales en el modulador



(a) Producto con la señal en fase.

(b) Producto con la señal en cuadratura.

Figura 32: Detección coherente.

dispositivos.

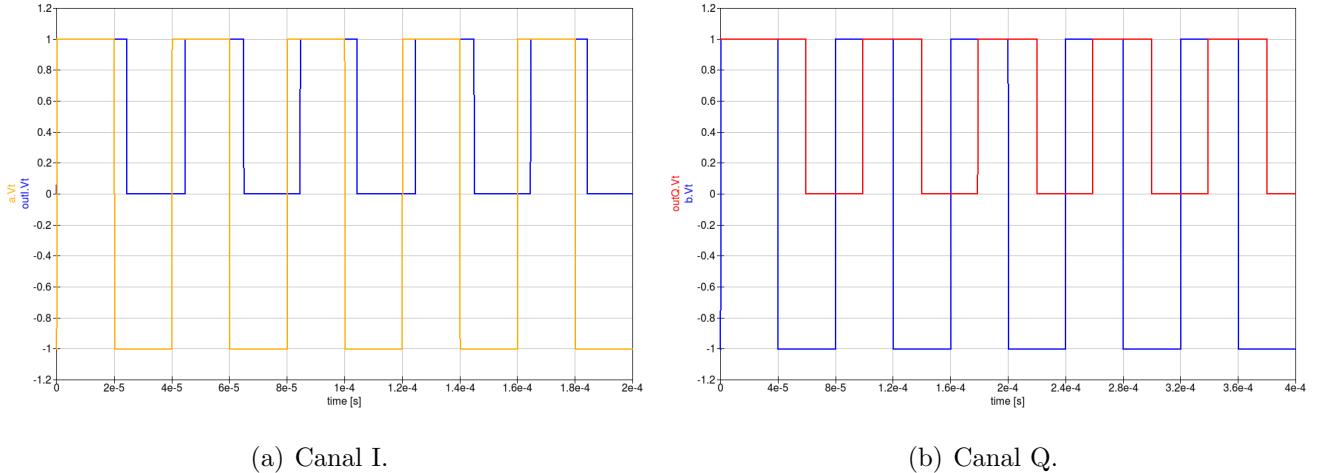


Figura 33: Comparación de señales originales y producidas por el modulador

3.3. Frecuency Shift Keying (FSK)

La modulación por desplazamiento de frecuencia modifica la frecuencia de la señal portadora en función del estado lógico de la señal moduladora. Esto puede modelarse de acuerdo a la ecuación (10)

$$\phi_{FSK} = A_C \sin(\omega_C + x(t) \times \Delta\omega) \quad (10)$$

Donde puede observarse que la amplitud de la portadora A_C se mantiene constante y la frecuencia de la misma cambia una cantidad $\Delta\omega$ cuando la señal modulante $x(t)$ está en estado alto, de lo contrario la frecuencia de la portadora no cambia.

Una forma sencilla de lograr esta modulación consiste en emplear un oscilador controlado por voltaje (VCO) cuya entrada sea la señal modulante, cuando ésta presente un cero lógico el circuito oscilará a su frecuencia libre. Si se presenta un 1 la frecuencia cambiará de acuerdo a la constante del VCO. El esquema de simulación del transmisor se muestra en la figura 34.

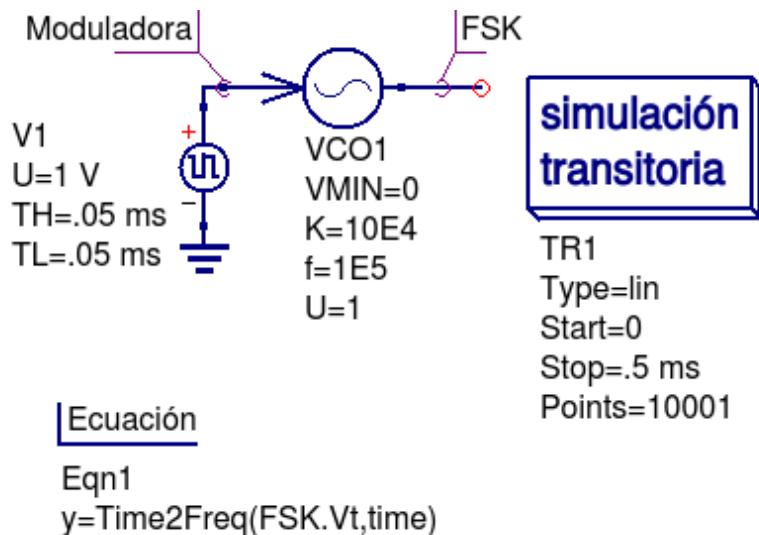
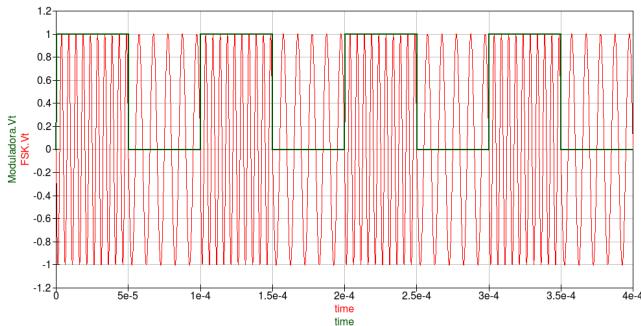


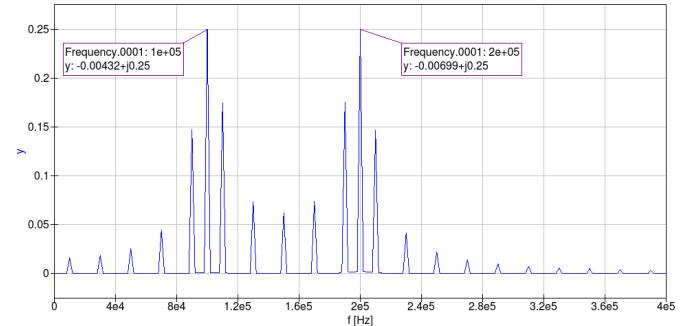
Figura 34: Modulador de FSK.

Como se observa la frecuencia libre de oscilación se ajusta a 100 KHz mientras la constante K de desviación en frecuencia es 100 KHz/V. Se ajusta el nivel mínimo posible a la entrada en 0 V, es decir que el mínimo voltaje al cual responderá el VCO y cambiará la frecuencia de salida es el mencionado anteriormente.

Como resultado de la simulación se observa en la figura 35(a) que, cuando la modulante presenta un 0 lógico la portadora oscila a la frecuencia libre, mientras que en presencia del estado lógico alto la frecuencia se duplica. En la figura 35(b) se muestra el espectro de frecuencias de la señal modulada en FSK, aquí se aprecia las componentes de las portadoras a 100 y 200 KHz además de las bandas laterales que aporta la señal cuadrada en el proceso de mezcla.



(a) Salida del modulador.



(b) Espectro de salida del modulador.

Figura 35: Modulación FSK.

La demodulación puede entenderse de manera conceptual si se considera la señal ϕ_{FSK} como la suma de dos ϕ_{ASK} , la primera a una frecuencia de 100 KHz que presente portadora cuando la modulante este en 0 mientras que la segunda oscile a 200 KHz y module con los 1. En resumen una señal OOK para la modulante y otra para la modulante negada. Teniendo esto en cuenta el demodulador debe emplear un par de filtros para separar las OOK y demodular a cada una de ellas con su correspondiente portadora. Luego se debe invertir la señal que demodula a los ceros y finalmente se obtiene la banda base sumando las dos salidas.

4. Conclusiones

En este práctico profundizamos sobre los principios de la transmisión analógica, implementando circuitos de modulación tanto en AM como en FM y realizando la simulación de sistemas de comunicaciones digitales básicos. Al desarrollar la implementación, se comprendió mucho más acerca del modo de comportamiento, sobre todo cuando se varía el índice de modulación, y los efectos que tiene sobre la señal de salida.

Se entiende entonces la importancia de controlar el índice de modulación adecuadamente para una óptima comunicación entre dispositivos que empleen AM debido a que si el mismo supera la unidad se produce distorsión, evitando así la regeneración de la banda. En la experiencia pudimos obtenerlo midiendo las crestas y valles de la señal resultante y luego calculando en base a estos resultados. Otro método puede aplicarse usando el espectro característico usando una analizador espectral cuyo eje de amplitudes esté en dB, de esta forma es más sencillo observar señales de AM con índices de modulación bajos.

En cuanto a la modulación en FM, no pudo lograrse con eficacia. Tan solo se concreto el oscilador que proporcionaría la portadora. Sobre esta señal pudimos efectuar mediciones de frecuencia, amplitud y potencia sobre la carga y distorsión presente en la señal generada. Debemos resaltar la importancia en la realización práctica del circuito de todas las variables tener en cuenta al trabajar en el rango de frecuencias de VHF, tales como el layout del circuito impreso y la calidad de los componentes a utilizar. Una desventaja del circuito empleado es la falta de estabilidad pues el ajuste del diodo varicap obligaba a ajustar el potenciómetro a tope (haciendo que la tensión inversa del diodo sea igual a V_{CC}) porque de lo contrario el circuito no oscilaba correctamente.

Respecto a las modulaciones digitales, se aprovecho la versatilidad del simulador QUCS para implementar los circuitos moduladores y demoduladores empleando bloques de funciones sencillas facilitando así la construcción de los sistemas estudiados. En los sistemas que emplean demodulación sincrónica una etapa que no se menciona pero es de mucha importancia práctica es la de recuperación de portadora. Existen diferentes tipos de circuitos que llevan a cabo esta función, a continuación se enumeran los mas empleados:

- Lazo cuadrático: Consta de un filtro pasa bandas de entrada para reducir el ancho del espectro de ruido recibido, luego se eleva al cuadrado la señal quitándole así la modulación que pudiese tener la señal y generando la segunda armónica de la portadora. Un PLL se encarga de hallar la fase correcta de esta señal cuya frecuencia luego se divide por 2.
- Lazo de Costas: Este método también es llamado de cuadratura. Se emplea un esquema parecido al demodulador QPSK pero las salidas demoduladas I y Q alimentan un detector de productos balanceados cuyo resultado alimenta un filtro pasa bajos que comanda un VCO que es el que genera las señales en fase que se mezclan con la entrada
- Remodulador. Mezcla la señal de entrada con la señal de salida, esta salida es proporcional al doble del error de fase, éste último alimenta un VCO que es el generador de I y Q, el mismo se ajusta hasta estar en fase con la portadora original.

Las técnicas de modulación multinivel son de especial interés pues las mismas hacen un mejor uso de los canales de comunicación, en caso del ancho de banda de una señal modulada en NPSK esta dado por la ecuación (11):

$$B_{NPSK} = \frac{2[\frac{v}{2}(1 + \varphi)]}{\log_2 N} \quad (11)$$

donde φ es el *roll-off* de los filtros empleados que sirven para acotar en banda las señales digitales. Se observa claramente como el ancho de banda es menor mientras mayor cantidad de bits se agrupan. En el caso de la recuperación de la portadora se usan técnicas similares a los receptores de PSK pero empleando armónicas pares mas altas.

En general podemos concluir, en que los constantes avances en electrónica, y particularmente en comunicaciones nos proporcionan una extensa gama de configuraciones discretas e integrados de diversas formas y tamaño con muchas funciones que permiten modular señales lo interesante es conocerlas y saber elegir la opción adecuada a cada necesidad particular.