

Detección Coherente en Modulación de Producto con Recuperación de Portadora a partir de la Segunda Armónica

Resumen: *En el presente trabajo se analiza un proceso MoDem (modulación-demodulación) por producto. Como aspecto fundamental se plantea la detección sincrónica (o coherente) de la señal modulada utilizando la recuperación de la portadora a partir de la misma onda modulada. Esto se logra pasando la señal por un dispositivo no lineal y recuperando la segunda armónica de la portadora en fase con la original de la modulación, obteniendo la fundamental por división y filtrado, para luego ser reinyectada y completar la demodulación.*

Palabras Claves: *MoDem, detección coherente, armónica, no lineal.*

Abstract: *In this paper it is analyzed a particular process to perform a product MoDem (modulation-demodulation). As a fundamental aspect it is performed the synchronous detection of the modulated signal by using the carrier recovered from the same modulated signal. This is achieved by passing the signal through a non-linear device and retrieving the second harmonic of the carrier in phase with the original modulation, obtaining the fundamental by filtering and division process, for later being re-injected in order to complete the demodulation.*

Keywords: *MoDem, synchronous detection, harmonica, nonlinear*

Pedro E. Danizio¹, Eduardo R. Danizio², Eduardo J. Menso¹, Alejandro D. Danizio¹, Marcelo O. Cejas²

¹Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba. Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina. Ciudad Universitaria. Casilla de Correo 36 C.P. (X5016ZAA) Córdoba. (0351) 468-4215 / 468-4006 / 468-4317.

²Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Villa María Av. Universidad 450 - X5900

Villa María - Córdoba. (0353) 453-7500 / 01

Mail: pdanizio@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La modulación de producto, resulta de multiplicar temporalmente (convolucionar en frecuencia) una banda base por la portadora, dando por resultado una modulación de doble banda lateral con portadora suprimida. Para recuperar la banda base se aplica la detección coherente, esto significa que la onda modulada es multiplicada nuevamente por la portadora (Carlson, 2002). Esto da como resultado la banda base y la misma técnica en segunda armónica de portadora, necesitando un filtro pasabajo a la salida para obtener la señal modulante. Esta técnica de demodulación se la denomina detección coherente, o por reinyección de portadora, debiendo el receptor generar la misma, es decir la portadora (Strembler 1997).

En este trabajo se analiza la recuperación de la portadora a partir de la segunda armónica de la señal modulada, concepto que resulta algo dificultoso a la comprensión de los estudiantes de grado. Por ello como material de apoyo a la enseñanza de las comunicaciones analógicas se desarrolló este trabajo.

PROCESO MODEM

En la Fig. 1, se muestra el diagrama en bloques del proceso MoDem (Modulación-Demodulación) por producto.

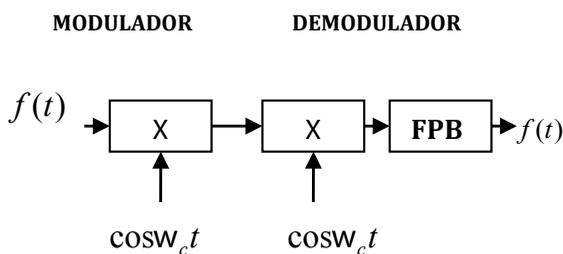


Fig. 1: Proceso MoDem por producto.

Donde

$f(t)$ = banda base temporal

$\cos(\omega_c t)$ = frecuencia de portadora

X = modulador de producto

FPB= filtro pasa bajo

La expresión de la onda modulada de manera temporal será:

$$f_{DSB}(t) = f(t) \cos(\omega_c t) \tag{1}$$

Donde

$\phi_{DSB}(t)$ = función temporal de modulación de producto.

Las transformadas de la banda base, la portadora y la modulada serán:

$$\begin{aligned} f(t) &\Leftrightarrow F(\omega) \\ \cos \omega_c t &\Leftrightarrow \pi [\delta(\omega + \omega_c) + \delta(\omega - \omega_c)] \\ \phi_{DSB}(t) &\Leftrightarrow \Phi_{DSB}(\omega) \end{aligned}$$

La transformada de la señal modulada (1), será el producto convolución de la transformada de la banda base y la portadora, se muestra en (2).

$$\begin{aligned} \Phi_{DSB}(\omega) &= \frac{1}{2\pi} F(\omega) \\ &* \pi [\delta(\omega + \omega_c) + \delta(\omega - \omega_c)] \end{aligned} \tag{2}$$

Donde:

* representa el producto convolución en frecuencia.

Resolviendo el producto convolución de (2), la señal modulada en frecuencia será (3).

$$\Phi_{DSB}(\omega) = \frac{1}{2} [F(\omega + \omega_c) + F(\omega - \omega_c)] \quad (3)$$

Vemos que la banda base se desplazo a ambos lados de la portadora generándose la doble banda lateral con portadora suprimida (Lathi, 1989).

Para demodular esta señal es menester utilizar detección coherente, esto significa que se debe multiplicar la señal modulada nuevamente por la portadora. Esto da como resultado, la banda base y la misma técnica de modulación de producto, en segunda armónica de portadora. Para lo cual como se desea recuperar la banda base se hacer menester utilizar un filtro pasa bajo para obtenerla. La (4), presenta la expresión de manera temporal. Mientras que la (5) resuelve la expresión, como resultado del producto convolución en frecuencia (Couch II, 1989).

$$\begin{aligned} \phi_{DSBD}(t) &= f(t) \cos^2(\omega_c t) = \\ &= \frac{1}{2} f(t) + \frac{1}{2} f(t) \cos(2\omega_c t) \end{aligned} \quad (4)$$

$\phi_{DSBD}(t)$ = detección sincrónica de la $\phi_{DSB}(t)$

$$\begin{aligned} \Phi_{DSBD}(\omega) &= \frac{1}{2} F(\omega) + \\ &+ \frac{1}{4} F(\omega + 2\omega_c) + \frac{1}{4} F(\omega - 2\omega_c) \end{aligned} \quad (5)$$

$\phi_{DSBD}(w)$ = dcomposición espectral de $\phi_{DSB}(t)$

La $f(t)$ se obtiene a la salida del filtro pasabajo, donde se convolucionan la respuesta temporal de filtro pasa bajo (FPB) con la señal modulada temporal expresado en la (6).

$$f(t) = \phi_{DSBD}(t) * h_B(t) \quad (6)$$

Donde:

$h_{PB}(t)$ función de transferencia ideal, temporal del FPB.

Expresando la composición espectral de la banda base como el producto de la función de transferencia en frecuencia del filtro pasa bajo y la composición espectral de la señal modulada, tal como se muestra en (7).

$$F(\omega) = \Phi_{DSBD}(\omega) H_B(\omega) \quad (7)$$

$H_{PB}(w)$ = función de transferencia en frecuencia del FPB, suponemos la respuesta de un filtro ideal.

RECUPERACIÓN DE LA PORTADORA

Esta técnica exige la detección sincrónica y eso implica reinyectar la portadora en frecuencia y en fase tal cual fue generada (Danizio 2014). La señal modulada resultante no tiene presente la portadora en su seno por eso se la denomina doble banda lateral con portadora suprimida. Pero si pasamos la señal modulada por un sistema no lineal, la composición espectral resultante tiene la segunda armónica de la portadora presente en la salida y en fase con la original. De tal manera que si se la sintoniza y se la divide es posible obtener la portadora original y reinyectarla.

Si se pasa la señal modulada por un amplificador clase B, se obtiene a la salida el equivalente de una rectificación en media onda obteniendo la siguiente expresión periódica simplificada (8).

$$\begin{aligned} \phi_{DSBNL}(t) &= K_0 + \sum_{n=2}^{\infty} K_n \cos(n\omega_m t) + K_c \phi_{DSB} \cdot \\ &\sum_{m=2}^{\infty} K_m \cos(m\omega_c t) + \sum_{g=2}^{\infty} K_g \cos(g\omega_c \pm 2\omega_m) t \end{aligned} \quad (8)$$

Donde:

- $\phi_{DSBNL}(t)$ = doble banda lateral no linealizada.
- K_o = coeficiente de la componente continua.
- K_n = coeficientes pares de la frecuencia de banda base.
- K_t = coeficiente de la función modulada original.
- K_m = coeficiente pares de la frecuencia de portadora.
- K_g = coeficientes pares de las bandas laterales en segunda armónica de la frecuencia modulante.

La expresión muestra que la composición espectral más significativa está formada por una componente continua, la segunda armónica de la modulante, la modulación de producto en la frecuencia de portadora y la segunda armónica de la portadora aparece modulada en amplitud con bandas laterales armónicas pares de la modulante.

Para recuperar la portadora original se parte de filtrar la segunda y se pueden utilizar PLL de lazos cuadrático o eventualmente en este enfoque de aporte pedagógico, luego del filtrado se procede a limitar.

Esto significa obtener una onda cuadrada que pasada por un divisor por dos, tiene la componente espectral fundamental de la portadora, un nuevo filtrado en frecuencia de portadora entrega la frecuencia fundamental para ser reinyectada. Tal como lo muestra la Fig. 2

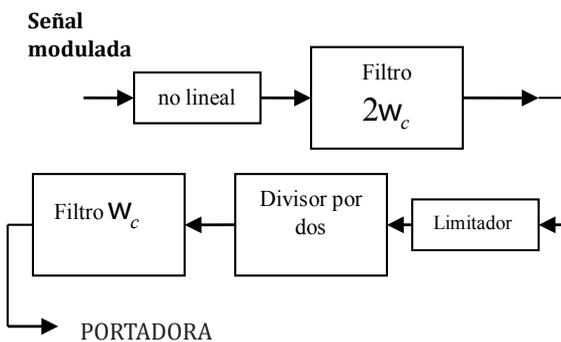


Fig. 2 - Diagrama en bloques de recuperación de la portadora.

SIMULACIÓN

El proceso MoDem, se simula en un entorno MultiSim versión 12. La portadora esta representada por una señal cosenoidal de 1 Voltio de amplitud y 100 KHz de frecuencia. Como banda base se utiliza un tono cosenoidal de 1 Voltio de amplitud y 10 KHz de frecuencia.

Las expresiones de la portadora (9), la modulante (10) se muestran a continuación.

$$e_c(t) = 1V \cos(2\pi 10^5 t)$$

$$e_m(t) = 1V \cos(2\pi 10^4 t) \tag{9}$$

Donde:

- $e_c(t)$ = portadora
- $e_m(t)$ = modulante

La señal modulada $\phi_{DSB}(t)$ se muestra en la (11).

$$\begin{aligned} \phi_{DSB}(t) &= e_c(t)e_m(t) = \cos(2\pi 10^5 t) \cos(2\pi 10^4 t) \\ &= \frac{1}{2} \cos(2\pi 110 \cdot 10^3 t) + \frac{1}{2} \cos(2\pi 90 \cdot 10^3 t) \end{aligned}$$

La señal modulada tiene dos bandas laterales ubicadas en 110 y 90 kHz y se muestra la representación temporal de la banda base, la portadora y la modulada en la Fig. 3 y en la 4 se presenta la composición espectral de la onda modulada con las dos componentes en 110 y 90 kHz.

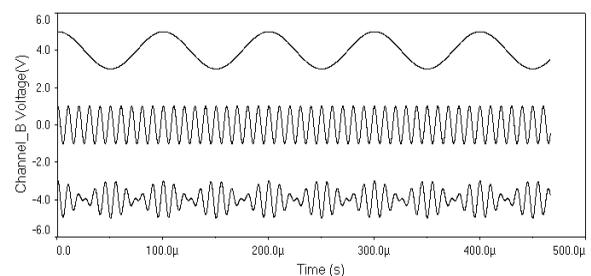


Fig. 3 - Representación temporal de la banda base la portadora y la modulada.

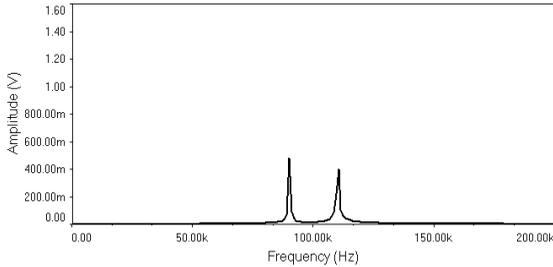


Fig. 4 - Representación en frecuencia de la señal modulada.

Antes de realizar la detección sincrónica se recupera portadora tal cual el modelo de la Fig. 2.

La señal $\phi_{DSB}(t)$ es pasada por un dispositivo no lineal que en la simulación es un amplificador clase B que actúa como un rectificador con amplificación. Esta señal la designaremos como $\phi_{DSB}(t)$, donde en la Fig. 5, se muestra la señal de manera temporal.

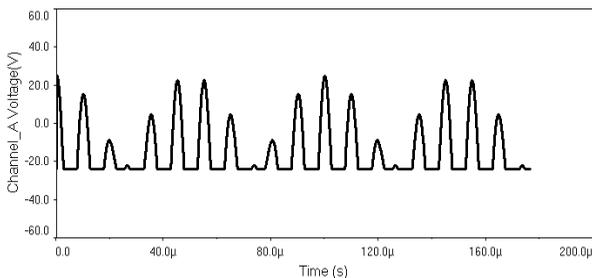


Fig. 5 - Representación temporal de la señal $\phi_{DSB}(t)$.

La composición espectral expresada en (8), se muestra en la Fig. 6 y la designamos como $\phi_{DSB}(w)$.

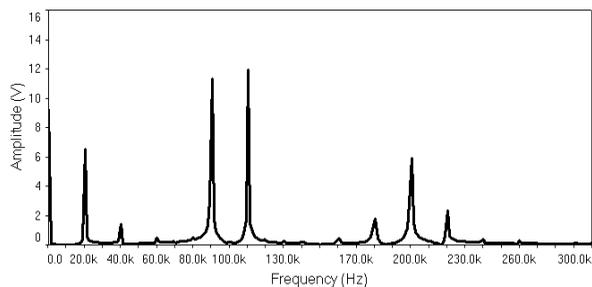


Fig.6 - Representación en frecuencia de la señal $\phi_{DSB}(w)$.

Esta composición espectral esta constituida por una componente continua, las armónicas pares de la banda base, que para este caso la mayor es de 20 KHz. También esta presente la modulación de producto inicial es decir doble banda lateral con portadora suprimida, en los 100 KHz, donde se ven las bandas laterales en 90 y 110 KHz. Pero como aspecto importante aparece la segunda armónica de la portadora (200 KHz), modulada en amplitud con las armónicas pares de la banda base, que generan bandas laterales en 180 y 220 kHz, estas son las de mayor amplitud. Es de notar que también aparece la señal de AM en las armónicas pares de la portadora tales como 400, 600 kHz, etc. que en este caso no se muestran, porque nos interesa la segunda armónica de la portadora

Esta segunda armónica de portadora no tiene cambios de fase y a partir de ella se puede obtener la frecuencia de portadora de 100 kHz con la fase inicial. Para lo cual luego del filtrado se muestra la señal recuperada de 200 kHz de forma temporal en la Fig. 7 y su composición espectral, en la Fig. 8.

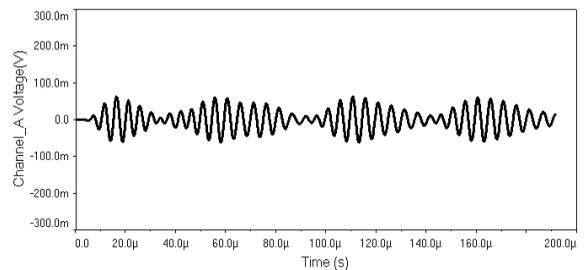


Fig.7 - Representación temporal de la segunda armónica a la salida del filtro.

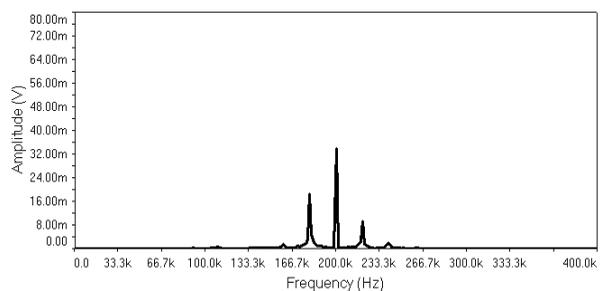


Fig.8 - Representación espectral de la segunda armónica a la salida del filtro.

Se observa que en la salida esta la segunda armónica de la portadora y aparecen las bandas laterales en 220 y 180 kHz, que corresponden a la segunda armónica de la modulante, por que el filtrado no puede eliminar totalmente estas componentes.

El proceso continua con limitar esta señal donde se muestra de manera temporal en la Fig. 9 y en la 10 la composición espectral.

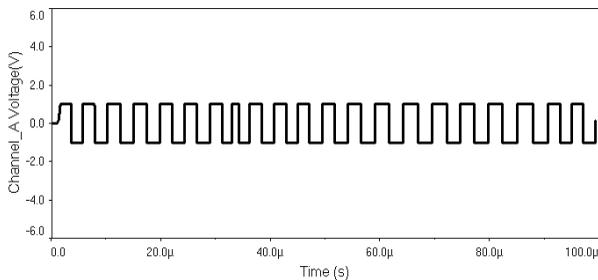


Fig.9 - Representación temporal de la señal limitada.

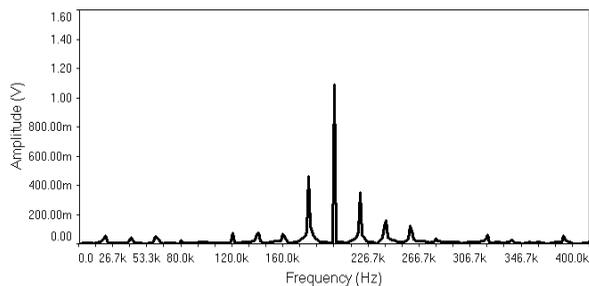


Fig.10 - Representación espectral de la señal limitada.

La señal pasa por un divisor por dos para luego filtrar la fundamental que es de 100 kHz. La señal temporal a la salida del divisor se muestra en la Fig. 11 y en la 12 la composición espectral.

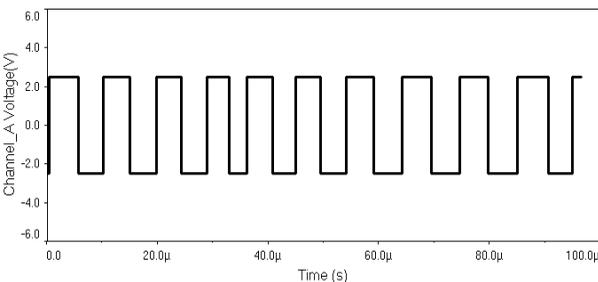


Fig.11 - Representación temporal de la señal a la salida del divisor.

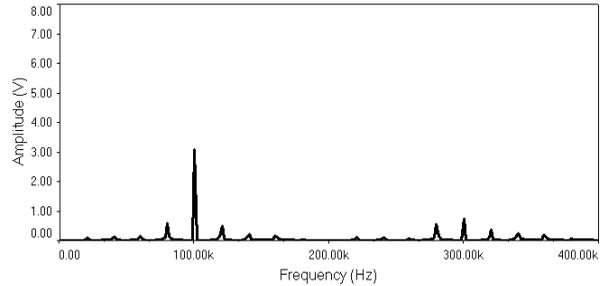


Fig.12 - Representación en frecuencia de la señal a la salida del divisor.

La señal es filtrada y se obtiene la portadora de 100 kHz, que será aplicada a la detección coherente, la Fig. 13 muestra la portadora de 100 kHz recuperada temporalmente y la 14 su espectro.

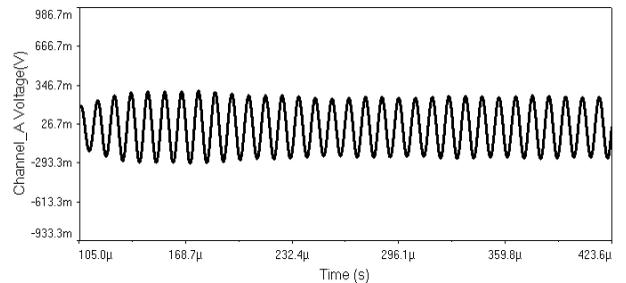


Fig.13 - Representación temporal de la señal portadora de 100 KHz.

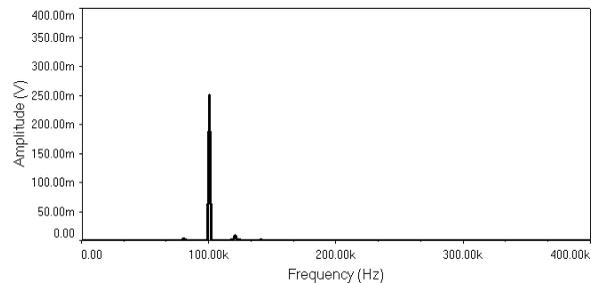


Fig.14 - Representación en frecuencia de la señal portadora de 100 kHz.

Recuperada la portadora de 100 KHz, se realiza la detección sincrónica multiplicando la señal modulada nuevamente por la portadora (12).

$$\begin{aligned}
 \phi_{DSBsd}(t) &= \phi_{DSB} \cdot e_c(t) = \\
 &= \cos^2(2\pi 10^5 t) \cos(2\pi 10^4 t) = \\
 &= \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(2\pi 2 \cdot 10^5 t) \right) \cos(2\pi 10^4 t) = \\
 &= \frac{1}{2} \cos(2\pi 10^4 t) + \\
 &+ \frac{1}{4} \cos(2\pi 2,1 \cdot 10^5 t) + \frac{1}{4} \cos(2\pi 1,9 \cdot 10^5 t)
 \end{aligned} \tag{12}$$

$\phi_{DSBsd}(t)$ = función de doble banda lateral detectada sincrónicamente.

Obteniendo la banda base en 10 kHz y la misma técnica en segunda armónica de portadora, con las dos bandas laterales en 210 y 190 kHz. Esto se muestra de manera temporal en la Fig. 15 y en la 16 su espectro en frecuencia.

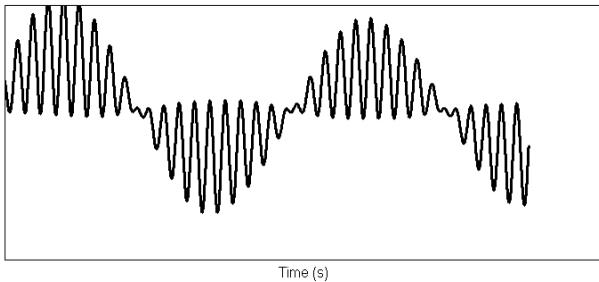


Fig. 14 - Representación temporal de la señal $\phi_{DSBsd}(t)$.

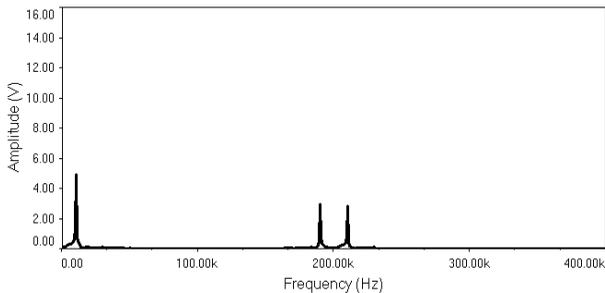


Fig. 15 - Representación en frecuencia de la Fig.14,

Para recuperar la banda base es menester filtrar

$$f(t) = \phi_{DSBsd}(t) * h_{pB} = K \cos(2\pi 10^4 t) \tag{13}$$

La señal recuperada en tiempo se muestra en la Fig. 16 y en frecuencia en la 17.

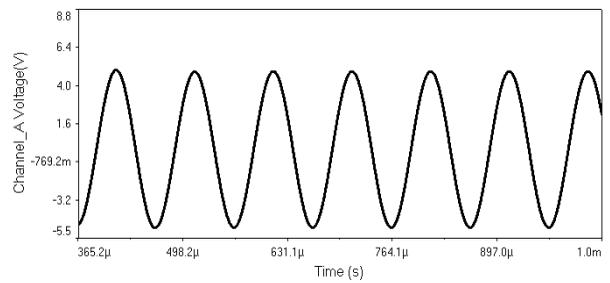


Fig. 16 - Representación temporal de la banda base.

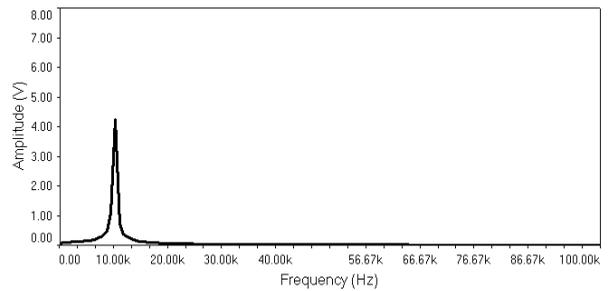


Fig. 17 - Representación en frecuencia de la banda.

CONCLUSIONES

Una señal modulada por producto puede ser detectada sincrónicamente reinyectando la portadora obtenida a partir de procesar la segunda armónica. La analítica de la composición espectral que resulta de pasar por un dispositivo no lineal una señal modulada por producto muestra entre sus componentes a la segunda armónica de la portadora. Con el adecuado proceso de filtrado y división se obtiene la fundamental para la reinyección en la detección.

REFERENCIAS

Carlson A., Crilly P., Rutledge J.: "Sistemas de Comunicación". 4º Edición. McGraw Hill. 152-158. (2002).

Strembler F. G.: "Introducción a los Sistemas de Comunicación". 3º Edición. Addison-Wesley;219-238, (1997).

Lathi B. P.: "Introducción a la Teoría y Sistemas de

Comunicación". 1º Edición. Limusa.155-159, (1989).

Couch II León. W. "Sistemas de Comunicación Digitales y Analógicos". 5º Edición. Prentice-Hall. 303-305 (1998).

Danizio Pedro: "Teoría de las Comunicaciones". 4º Edición. Universitas. 39-48, (2014).