

DISEÑO DE UN DEMODULADOR DE FM MEDIANTE PLL PARA LA INTERROGACIÓN DE SENSORES INTERFEROMÉTRICOS DE FIBRA ÓPTICA

Jesús Lorenzo Cisneros Hernández

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
al160585@alumnos.uacj.mx

Alejandro Rodríguez Antonio

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
al98621@alumnos.uacj.mx

Abimael Jiménez Pérez

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
abimael.jimenez@uacj.mx

José Mireles Jr. García

Universidad de Guadalajara
jmireles@uacj.mx

Rafael E. González Landaeta

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
rafael.gonzalez@uacj.mx

Ángel Saucedo Carvajal

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez
angel.sauceda@uacj.mx

Resumen

En este trabajo se diseñó y se construyó un sistema de interrogación de sensores interferométricos. El sistema está constituido por una etapa que emula la señal interferométrica típica de un sensor de este tipo: Primeramente, una etapa de acondicionamiento que convierte esta señal en una señal de FM convencional

y finalmente una etapa de demodulación de frecuencia; mediante el uso de la técnica de amarre de fase PLL, (del inglés: *Phase Lock Loop*). El proceso de demodulación, denominado en la literatura como “heterodino sintético”, utiliza un par de osciladores locales sintonizados a la frecuencia de la señal portadora y al doble de ésta. Así mismo, se requirieron una serie de filtros pasabanda tipo Butterworth de segundo orden para acotar el espectro de las señales de interés centrados en la frecuencia de la armónica necesaria para realizar el proceso de mezclado. Finalmente, la señal acondicionada se usó como entrada a un demodulador de FM mediante un PLL. Se consiguió recuperar señales del orden de miliradianes en el rango de 90 a 260 Hz. Se observó que este rango dependió del ancho de banda de los filtros pasabanda utilizados en el circuito. Se optó por esta técnica de demodulación basada en un PLL, pues logra la sintonización de una amplia gama de frecuencias, al ser también sintonizable el PLL a través de su VCO.

Palabras Claves: Demoduladores de FM, fase óptica, sensores interferométricos, PLL.

Abstract

In this work, an interrogation system of interferometric sensors was designed and constructed. The system consists of a stage emulating the interferometric signal typical of such sensor: First a conditioning stage that converts the above signal into a conventional FM signal and finally a frequency demodulation stage, based in the Phase Lock Loop technique o demodulate FM signals (PLL). The demodulation process used here, referred in the literature as "synthetic heterodyne", uses a pair of local oscillators, one tuned to the frequency of the carrier signal and the other one tuned at twice of the carrier frequency. It also requires a series of second-order Butterworth bandpass filters to limit the signals of interest and maintain a constant amplitude in the passband. As well as a trimmer to minimize the amplitude changes, in the final part of the conditioning stage. Finally, the conditioned signal was used as input to an FM demodulator via a PLL and signals of the order of miliradianes were achieved; with frequencies of modulating

signals in the range of 90 to 260 Hz. It was observed that this range depended on the bandwidth of the bandpass filters used in the circuit.

Keywords: *FM demodulators, Interferometric sensors, optical phase, PLL.*

1. Introducción

En el transcurso de las últimas décadas, ha ido en aumento el uso de sensores ópticos basados en fibra óptica debido a que son utilizados para medir variables físicas como distancias, desplazamientos, así como amplitud, frecuencia, intensidad y fase en movimientos oscilatorios. De estos resaltan los sensores interferométricos, que además permiten realizar mediciones de rugosidad en superficies, pueden medir desplazamientos horizontales o verticales y también encuentran amplia aplicabilidad en la medición de vibraciones con cierta frecuencia, entre otras.

Estos sensores basados en el fenómeno de interferencia óptica [Fang, 2015], operan como sigue: Una de las ondas que componen al sensor interferométrico, es expuesta a las características físicas del mesurando, y las variaciones de este modifican en fase a dicha onda, obteniendo una señal modulada en FM. Esta señal modulada interfiere con una onda de referencia estable sin modular, y la información de interés, es decir las variaciones presentes en el mesurando, se encuentra en la fase del patrón de intensidad resultante, y para extraer esta información se requiere de un demodulador de FM. Este trabajo se enfoca en el diseño, construcción y prueba de un demodulador de fase óptica con las características mencionadas anteriormente.

Antecedentes

Existen diversos métodos de demodulación de una señal modulada en fase óptica, uno de ellos, el método DCM (del inglés: *differential-and-cross-multiply*) que utiliza dos fotodetectores y una serie de operaciones matemáticas a través de amplificadores operacionales (OpAmp) configurados como diferenciador, derivador, multiplicador y una doble integración. Los resultados reportados con este método tienen una relación señal a ruido (SNR) de 80dB [Kumar, 2012], las

señales demoduladas no presentan distorsión y es factible tanto para señales débiles como fuertes.

Otro método de demodulación es el que usa un PLL (del inglés: *phase lock Loop*). Un PLL es un sistema de retroalimentación que comprende un comparador de fase, un filtro pasa bajas y un amplificador de error en la trayectoria de la señal hacia adelante y un VCO (*del inglés: voltage controlled oscillator*) en la trayectoria de la retroalimentación [Schlecker, 2013]. Cuando el PLL es enganchado a una señal de frecuencia modulada (FM), el VCO rastrea la frecuencia instantánea de la señal de entrada. La tensión de error filtrada fuerza al VCO a mantenerse unida con la señal de entrada, luego se convierte en la salida de FM demodulada [Silver, 2008]. La ventaja de este método estriba en la sintonización de una gama amplia de frecuencias al ser también sintonizable el PLL a través de su VCO [Udd, 2007]. En esta investigación se implementará el método de demodulación homodina, ya que es la que mejor resolución y sensibilidad ofrece. En este método se detectan las diferencias de fase existentes entre dos señales que se interfieren y se elimina la señal de desvanecimiento causada por las grandes derivas ambientales; esto se logra mediante la introducción de un gran desplazamiento de fase una frecuencia fuera de la banda de la señal [Dandridge, 2010]. Estas señales de gran amplitud llevan como bandas laterales las señales de interés.

Los resultados mostrados con la demodulación homodina han sido un alto rango dinámico, una buena linealidad y una sensibilidad de 10^{-6} radianes [Schlecker, 2013]. El esquema utilizado para este tipo de demodulación se muestra en la figura 1.

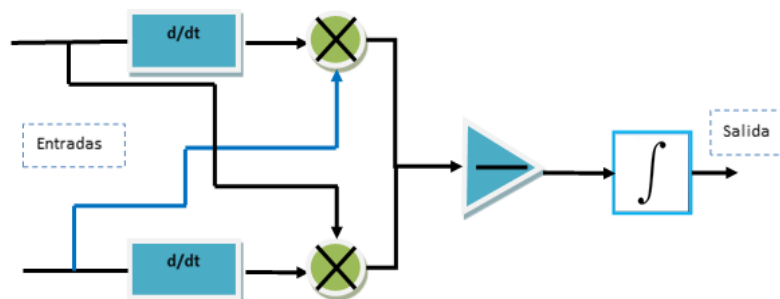


Figura 1 Esquemático de demodulador homodino.

2. Métodos

Para desarrollar el demodulador de FM, en primera instancia no se utilizó información procedente de algún mesurando, se decidió utilizar señales interferométricas controladas y reproducibles, tanto en amplitud como en frecuencia, para así poder verificar los resultados arrojados por el demodulador, y esto se logró implementando un emulador de interferogramas.

El método de demodulación seleccionado se simuló en el software de aplicación Cadence PSpice utilizando señales moduladoras de baja frecuencia, se observaron y se analizaron las formas de onda resultantes de cada etapa. Posteriormente se implementó el circuito electrónico del demodulador, y se verificó experimentalmente el rango de frecuencias y la amplitud mínima y máxima de la señal moduladora que el demodulador puede manejar, sin comprometer la calidad de la información obtenida:

- **Emulador de interferogramas.** Se implementó un emulador de interferogramas, debido a que durante el proceso de caracterización y prueba del sistema para extraer la señal de interés, se requerirían varias pruebas con interferogramas reproducibles y controlables en cuanto a la amplitud de la señal moduladora y de la portadora.

Este emulador se realizó con el generador de funciones trigonométricas AD639. La función de transferencia que sintetiza este IC, es la ecuación 1, en la que U representa la amplitud de la señal generada, y es la diferencia de voltaje entre la entrada $U_1 - U_2$, y estará en el rango de los 10mV a 10V. U_1 es polarizado con voltaje positivo, mientras que U_2 estará conectado a tierra. X_1 , X_2 , Y_1 , y Y_2 son las entradas diferenciales de los voltajes X y Y escaladas a $50^\circ/V$. LA

$$W = U \frac{\text{sen}(X_1 - X_2)}{\text{sen}(Y_1 - Y_2)} \quad (1)$$

Para generar el interferograma se introdujo una señal de 1 kHz con un amplitud de 5.8 Vpp como señal portadora (X_1), y una señal de 100 Hz y una amplitud de 200 mVpp como moduladora (X_2).

- **Selección del Método de Demodulación.** La elección del método de demodulación fue con base en las características que los diversos métodos presentaban. Se enfocó en cualidades como el ancho de banda en el cual el circuito opera y la posibilidad de que este fuera modificable para ser sintonizado en el rango de frecuencias de interés, además que la circuitería fuera simple sin dejar de un lado la eficiencia y la calidad de operación, por lo tanto, que se tuviera un control electrónico confiable.

En esta investigación se seleccionó el método de Detección Heterodina Sintética, porque como se mencionó antes, es el que mejor resolución y sensibilidad ofrece. Este método a partir de un solo interferograma genera las dos señales mediante un proceso de mezclado con osciladores trabajando a la frecuencia de la portadora y al doble de ésta. Posteriormente, mediante un filtraje pasa banda se selecciona la tercera armónica de la señal resultante del proceso de mezclado para después realizar la suma de las señales generadas en cada una de las ramas del detector; generándose así una señal resultante que después de aplicársele un proceso de eliminación de picos y un filtraje pasabanda adicional, se encuentra lista para introducirse al proceso de demodulación mediante el uso de un PLL. El diagrama a bloques de este demodulador se presenta en la figura 2.

- **Caracterización del demodulador para obtener sus especificaciones.** El circuito construido se caracterizó introduciendo una señal modulada en frecuencia con un generador de funciones marca Agilent 33220A con las siguientes características: una portadora de 1 kHz, una moduladora de 100 Hz, amplitud de 1 mV y un índice de modulación de 2 y se observó la señal de salida del demodulador en un osciloscopio Agilent DSO-X-2012, para observar tanto la forma de onda como su espectro de frecuencias. Se realizaron cambios de valores de la portadora y moduladora para el rango de frecuencia en el cual el demodulador deja de funcionar o presenta distorsión en su salida.

- **Construcción y Caracterización del Demodulador Seleccionado.** Se modificó el ancho de banda de los filtros del demodulador, y ser utilizado en un rango de baja frecuencia, para señales de interés que no sobrepasan los 300 Hz.

Todo el esquema de demodulación se muestra en el diagrama de bloques de la figura 2 donde BPF es filtro pasa banda, LPF es filtro pasa bajas y OSC es el oscilador local a ω_H y $2\omega_H$.

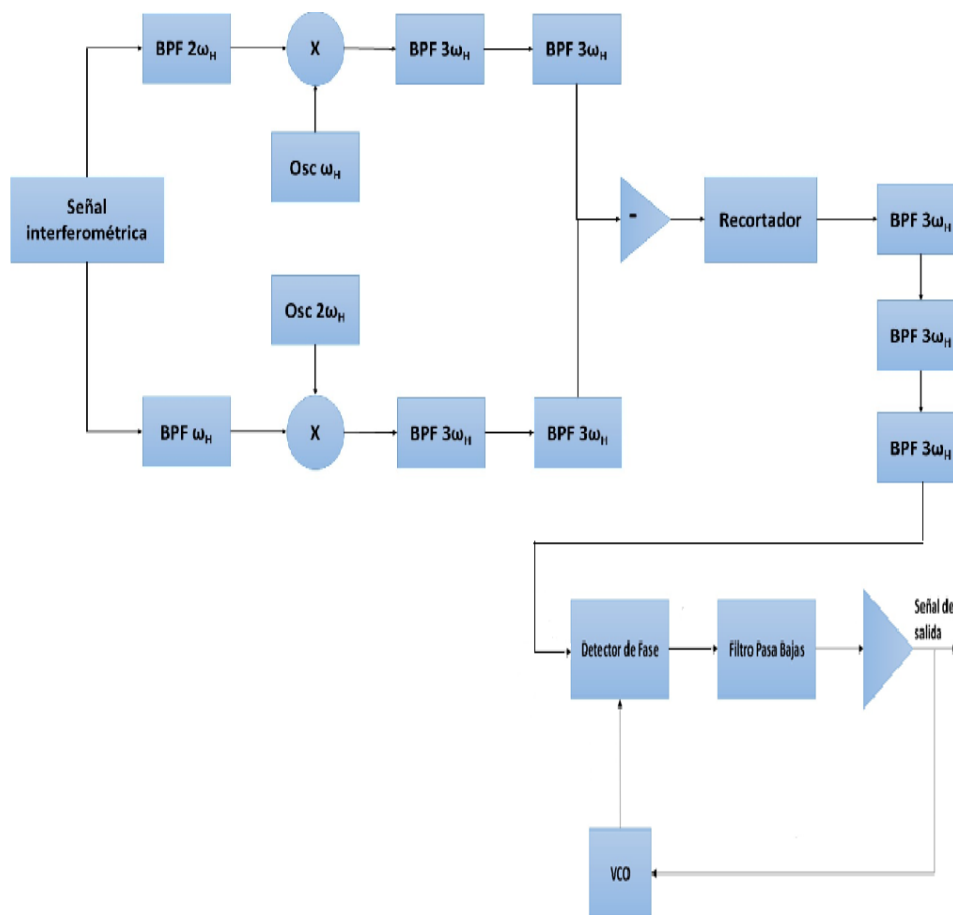


Figura 2 Diagrama a bloques del circuito demodulador utilizando PLL.

Filtros Pasabanda

Los filtros pasabanda se diseñaron con el circuito integrado UAF42 de Burr-Brown, son de segundo orden y poseen una arquitectura de filtros de variable de estado.

Multiplicadores

Los multiplicadores se construyeron con el circuito integrado AD633 cuya función de transferencia está dada por ecuación 2.

$$W = \frac{(X_1 - X_2)}{10V} \quad (2)$$

X_1 y X_2 representan voltajes de entrada que se convierten en fases, como se mencionó anteriormente.

Diseño del Oscilador Local

El diseño del oscilador local a ω_H utilizado corresponde a un oscilador de puente de Wien. Mientras que el oscilador local requerido a $2\omega_H$ se realizó utilizando un doblador de frecuencias a través de un multiplicador. La frecuencia del oscilador se define por la ecuación 3.

$$f_o = 1/2\pi R_{12} C_2 = \frac{1}{2\pi(158000)(1E^{-9})} = 1007 \quad (3)$$

Sumador

El sumador inversor permite combinar múltiples entradas, es decir, permite añadir algebraicamente dos (o más) señales o voltajes para formar la suma de dichas señales. La ganancia utilizada en nuestro diseño fue unitaria, por lo que el voltaje de salida del circuito es el mostrado en la ecuación 4, donde V_1 y V_2 representan las señales de entrada que serán sumadas.

$$V_{out} = -(V_1 + V_2) \quad (4)$$

Recortador

El recortador utiliza un diodo Zener BZX55C2V7, cuyo voltaje de operación es de 2.7 V, este limita la amplitud de la señal y con ello se logra una amplitud constante en toda la señal, minimizando los efectos de la variación de amplitud y así la distorsión adicional ocasionada por variaciones de amplitud indeseables en la señal que entrará al PLL para su posterior demodulación. Cuando la salida trata de exceder el voltaje zener, el zener entra en la región de avalancha y la salida queda recortada.

PLL

La parte central del demodulador la constituye el circuito mostrada en la figura 3, el demodulador de FM mediante PLL. La frecuencia del VCO está determinada por la ecuación 5 y en este caso se diseñó para una frecuencia de portadora de 3000 Hz para que pudiera engancharse con la señal modulada y se produjera la demodulación de FM.

$$VCO = \frac{0.3}{RT * CT} = \frac{0.3}{(4545 \Omega)(.022 \mu F)} = 3.0 \text{ kHz} \quad (5)$$

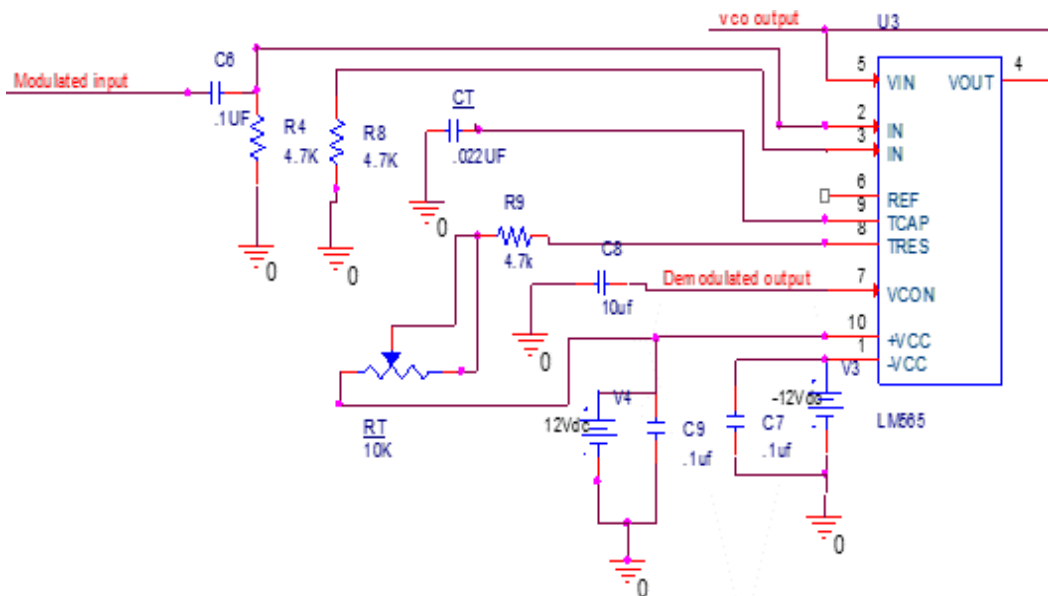


Figura 3 Diagrama del circuito demodulador de FM usando PLL.

Una vez ajustado el VCO a la frecuencia de la portadora que posee la señal modulada se procede al amarre de fase y a la demodulación de la señal. Se utilizó el IC LM565 al ser un circuito integrado que nos brinda sencillez en el diseño del circuito demodulador, sin dejar a un lado la calidad de este.

Filtro Pasabajas

El filtro pasabajas colocado en la etapa final del demodulador se construyó usando el circuito integrado UAF42. Su frecuencia de corte se calculó con base en la ecuación 6 y considerando un valor de $C=1000 \text{ pF}$.

$$F_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(530500)(1E^{-9})} = 300 \text{ Hz} \quad (6)$$

Las características principales de este filtro fueron, un ancho de banda de 350 Hz y una banda de paso con caída de 6 dB por década.

3. Resultados

En este apartado se presentan los resultados experimentales obtenidos mediante la prueba del sistema construido.

Emulador de Interferogramas

La figura 4 muestra la señal generada por el emulador de interferogramas y la figura 5 muestra el espectro de frecuencias correspondiente a esta. En el espectro de Fourier de esta señal se puede ver que los valores de la portadora en 1 kHz y sus respectivos armónicos, así como también los valores de la moduladora con valor de 100 Hz presentes como bandas laterales de la portadora.

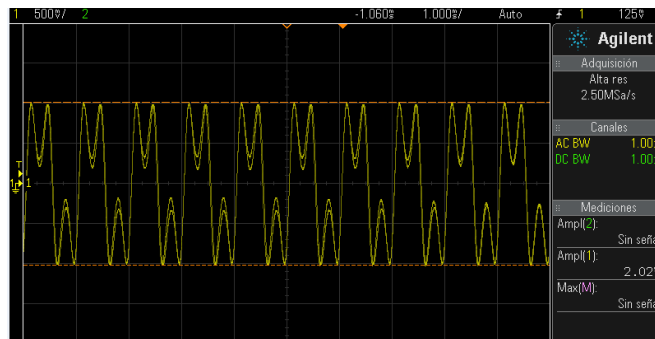


Figura 4 Interferograma obtenido con el emulador.

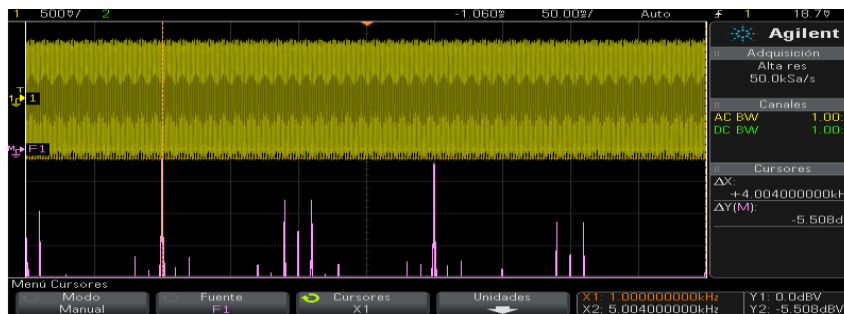


Figura 5 Espectro de frecuencias correspondiente a señal del simulador interferométrico.

Reproducción del Método de Demodulación a Utilizar

En la figura 6 se muestra la señal modulada en FM con un aportadora de 1 kHz y una moduladora de 100 Hz la cual fue introducida en el circuito PLL con una amplitud de 0.1 mV.

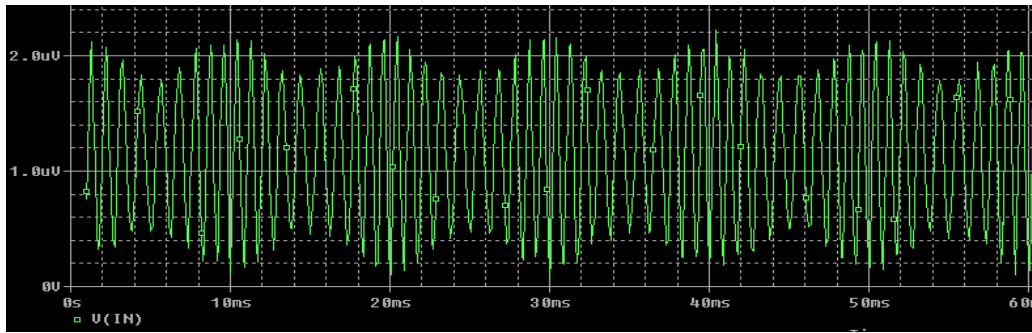


Figura 6 Señal modulada en frecuencia introducida en el demodulador de tipo PLL.

En la figura 7 se muestra la forma de onda obtenida en el simulador para una señal demodulada a través del PLL, corresponde a una senoidal con una frecuencia de 100 Hz.

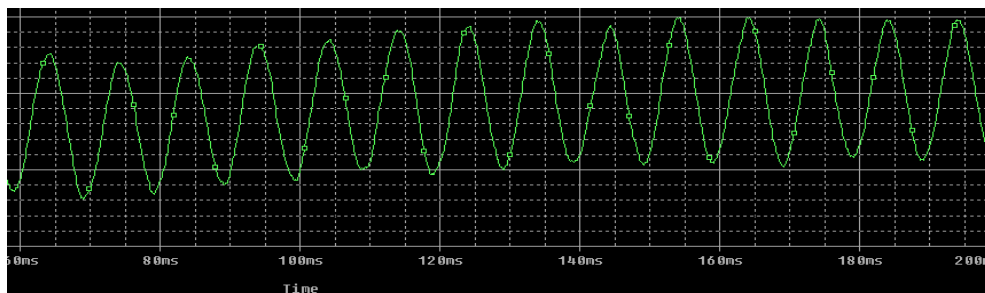


Figura 7 Forma de onda de la señal demodulada de 100 Hz.

Rediseño, Construcción y Caracterización del Demodulador Seleccionado, Mejorando la Relación Señal a Ruido

A continuación, se presentan los resultados obtenidos cuando la señal del interferograma correspondiente a la figura 5 y es procesada en cada etapa del demodulador. Por cuestiones de espacio se muestran solo las señales experimentales y solo en algunos casos se muestran las señales obtenidas con el simulador.

Filtros Pasabanda Centrados en 1 y en 2 kHz

En las figuras 8a y 8b se presenta la señal obtenida a la salida del filtro pasabanda centrado en 1 kHz.

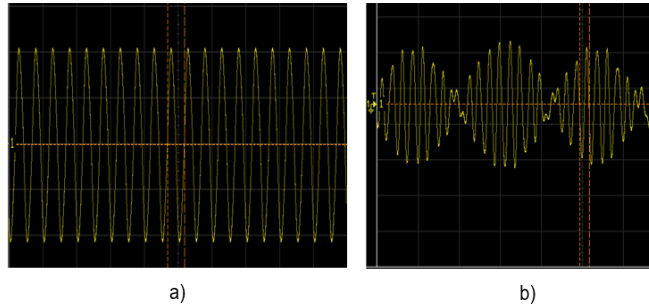


Figura 8 Señal entregada por el filtro pasabanda centrado en 1 kHz

Multiplicador del Canal 1

Como se mencionó anteriormente, existen dos etapas de mezclado o multiplicación, es decir, dos canales: el canal 1 situado en la parte superior del diagrama esquemático y el canal 2 situado en la parte inferior.

A continuación, en la figura 9a y figura 9b se presentan las señales obtenidas al multiplicar la señal de la figura 8a o figura 8b con una señal senoidal de 1 kHz.

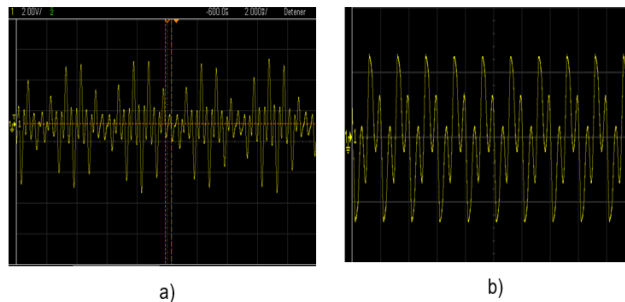


Figura 9 Señal entregada por los multiplicadores a) canal 1 y b) canal 2.

Etapas del Filtro Pasabanda en 3 kHz del Canal 1 y Canal 2

En la figura 10a y 10b se muestran las señales correspondientes a la salida de la etapa del filtro pasabanda centrado en 3 kHz de ambos canales.

Etapas del Sumador y del Recortador

La figura 11 se presenta la señal correspondiente a la salida tanto del sumador como de la etapa recortadora.

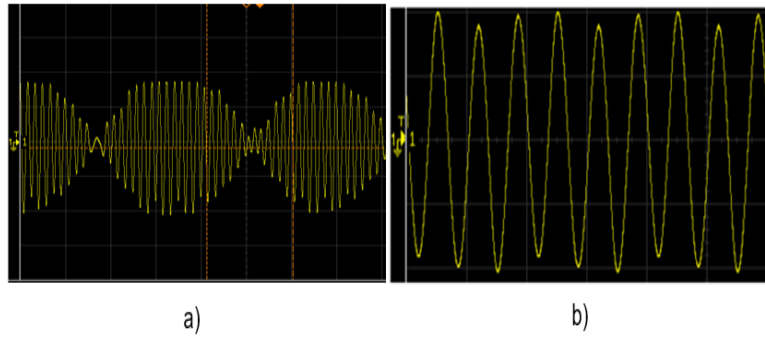


Figura 10 Señal entregada por filtro pasabanda a) canal 1 centrada en 3 kHz y b) canal 2.

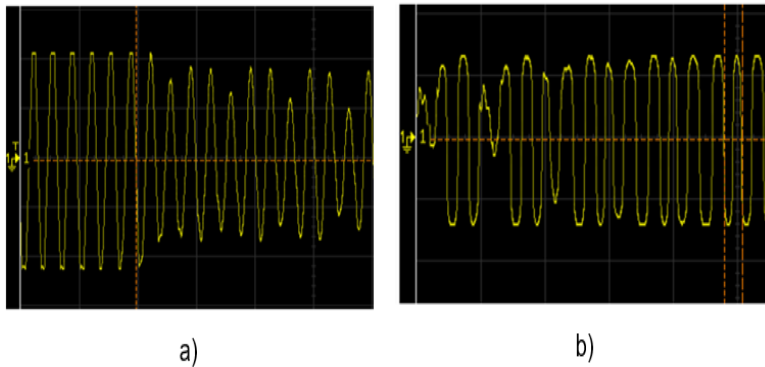


Figura 11 a) Señal entregada por el sumador y b) señal obtenida salida del recortador.

Etapa del Filtro Pasabanda en 3 kHz Previo a la Etapa del PLL

En la figura 12 se muestra la señal correspondiente a la salida del filtro pasabanda centrado en 3 kHz.

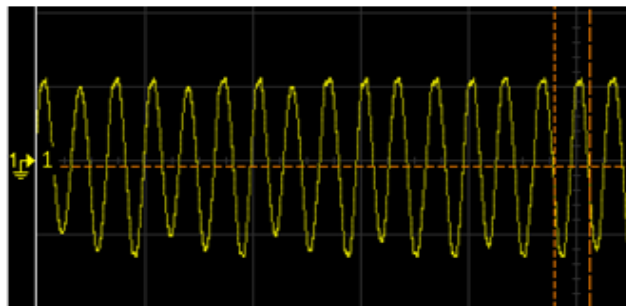


Figura 12 Señal entregada por filtro pasabanda de 3 kHz.

Etapa del PLL

La etapa medular del sistema de interrogación la constituye el demodulador de FM. Se presenta en la figura 13a la señal correspondiente a la salida del PLL.

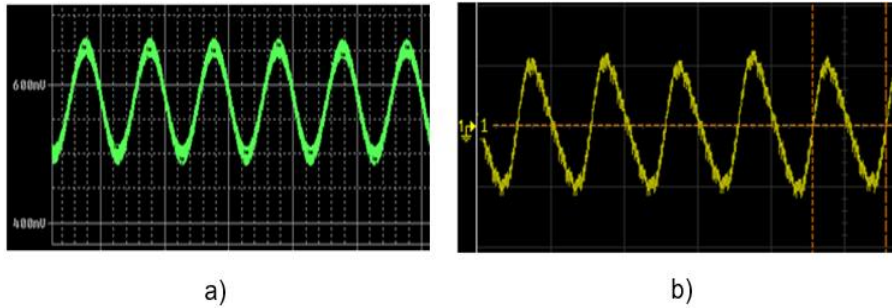


Figura 13 Señal correspondiente a salida del PLL. a) con simulador y b) con circuito físico.

Etapa del Filtro Pasabajas

La etapa del filtro pasabajas se desarrolló con frecuencia de corte en 350 Hz. Usando el emulador creamos 3 interferogramas, con señales moduladoras de diferentes valores de frecuencia 98.150 y 263 Hz. Al ser extraídas del circuito demodulador de fase óptica estas se muestran en los incisos de la figura 14 respectivamente. Se aprecian la forma de onda experimental y su comparación con la forma de onda original y se observan las distorsiones que se presentan a diferentes frecuencias para determinar el rango de operación óptimo. Señal recuperada (color amarillo) correspondiente a la moduladora introducida al inicio del circuito demodulador (color verde) y se compara la señal extraída respecto a su forma de onda para observar si existen deformaciones.

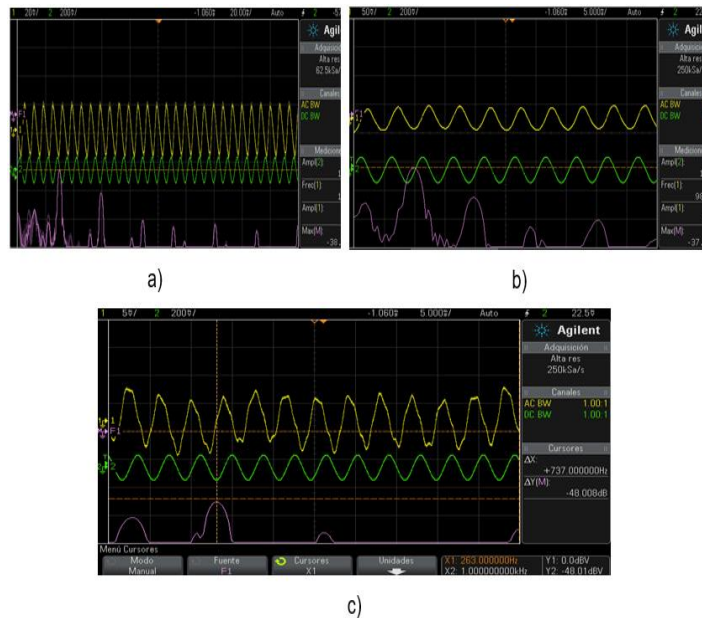


Figura 14 Señal moduladora: a) 150 Hz, b) 98 Hz y c) 263 Hz.

4. Discusión

La aplicación de las técnicas de demodulación de FM, a la interrogación de sensores interferométricos ha permitido que se pueda demodular o recuperar la fase óptica y consecuentemente la información codificada en la fase de un interferograma utilizando un circuito eléctrico. En particular, el uso de un PLL ofrece una gran oportunidad de diseñar sistemas de medición que operen en tiempo real con una resolución y una sensibilidad suficientemente buenas como para detectar cambios de fase en el orden de los miliradianes, aunque ya se han reportado la detección de hasta microradianes.

5. Conclusiones

Mediante el diseño y construcción del demodulador de fase óptica se concluye lo siguiente:

- Se diseñó y se construyó un circuito electrónico basado en el circuito integrado AD639 para generar una señal eléctrica que emula la señal generada por un biosensor óptico interferométrico.
- Mediante este simulador de interferogramas fue posible variar sistemáticamente y de manera controlada las variables de interés de un interferograma, como son amplitud y frecuencia y la fase estática de cada una de ellas; tanto de la señal portadora como de la moduladora, con la posibilidad de ingresar ruido aleatorio al sistema.
- Mediante este método demodulación se logró demodular señales del orden de miliradianes mediante la simulación en bloques de las etapas tanto de acondicionamiento previo al PLL para generar una señal típica de FM como la demodulación a través del PLL, esto a través de las librerías ABM de Orcad 16.6. lite
- La caracterización del demodulador seleccionado se logró mediante el espectro de frecuencias analizado a través de Orcad 16.6 lite y se concluye que es posible demodular señales de diversos rangos de frecuencias modificando tanto los rangos de operación de los osciladores locales para igualar la frecuencia de la portadora, como modificando el ancho de banda

de los filtros y el rango del VCO del PLL, así el conjunto de estas modificaciones permite sintonizar el rango de operación.

- Ajustando el conjunto de rangos señalados en el punto anterior referente a la caracterización (rango de operación del VCO, filtro pasabanda y osciladores locales) a 3 *kHz* se lograron demodular señales en el rango de frecuencias de moduladora de 80-260 *Hz*. Este rango de operación es modificable con base en la modificación del ancho de banda de los filtros pasabanda utilizados en el circuito y al rango de captura del PLL.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Dandridge, A. y A. B. Tveten. Homodyne Demodulation Scheme For Fiber Optic Sensors Using Phase Generated Carrier, *IEEE Photonics Soc.*, vol. 18, no. 10, pp. 1647–1653, 2010.
- [2] Fang, W. Jia, Q. Zhen, S. Chen, J. Cheng, X. y Yu, B. Low Coherence Fiber Differentiating Interferometer And Its Passive Demodulation Schemes, *Opt. Fiber Technol.*, vol. 21, no. 2015, pp. 34–39, 2015.
- [3] Kumar, R. Barrios, E. MacRae, A. Cairns, E. Huntington, E. H. y Lvovsky, A. I. Versatile Wideband Balanced Detector for Quantum Optical Homodyne tomography, *Opt. Commun.*, vol. 285, no. 24, pp. 5259–5267, 2012.
- [4] Malacara, D. *Óptica Básica*, Segunda edición, México: Fondo de Cultura Económica, pp. 532, 2004.
- [5] Malacara, D. *Optical Shop Testing*, Tercera edición, New Jersey: John Wiley & Sons, pp. 862, 2007.
- [6] McKinney, J. D. Colladay, K. y Williams, K. J. Linearization of phase-modulated analog optical links employing interferometric demodulation, *J. Light. Technol.*, vol. 27, no. 9, pp. 1212–1220, 2009.
- [7] Nolte, D. *Optical Interferometry for Biology and Medicine*, West Lafayette, IN, USA: Springer Science+Business Media, 2012.
- [8] Schlecker, B. Ortmanns, M. Anders, J. and Fantner, G. PLL-based high-speed demodulation of FM signals for real-time AFM applications, *Proc. - IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, pp. 197–200, 2013.

- [9] Silver, H. W. Experiment #68 — Phase Locked, Loops the Basic, hands-on radio, pp. 2, 2008.
- [10] Udd, E. Fiber Optic Sensors An Introduction for Engineers and Scientists, Segunda edición, New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [11] Zibar, D. Johansson, L. A. Chou, H. F. Ramaswamy, A. Rodwell, M. and Bowers, J. E. Novel optical phase demodulator based on a sampling phase-locked loop, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 19, no. 9, pp. 686–688, 2007.