



Interferómetro de fibra óptica aplicado para controlar la posición de un sistema péndulo-hélice

F. Gutiérrez Zainos¹, I. Romero Sosa¹, A. Osorio Ignacio¹, M. Sánchez Sánchez¹, J. J. Carmona Rodríguez²

¹ Universidad del Papaloapan Campus Loma Bonita Av. Ferrocarril s/n, San Antonio, Loma Bonita, Oax. 68400

² Universidad Tecnológica de la Mixteca, Carretera a Acatlima Km. 2.5 Huajuapán de León, Oax., 69000

Resumen

Se presenta una configuración de un interferómetro de Sagnac de fibra óptica con dos placas retardadoras colocadas de manera simétrica en el lazo. El arreglo se propone para controlar la posición angular de un sistema péndulo-hélice mediante la rotación de las placas retardadoras. El sistema basa su funcionamiento en controlar la amplitud del haz de salida del interferómetro rotando las placas las cuales varían los estados de polarización de la luz que viaja en el lazo de fibra. La amplitud de salida del interferómetro pasa primero por un detector y se manda a un amplificador de con ganancia -1 y luego a un convertidor analógico digital, ambos contenidos en la tarjeta de desarrollo Spartan 3E 1600E. En el FPGA de la tarjeta se programan la ganancia del amplificador, la rutina de conversión de la señal analógica a señal digital, y un módulo PWM para controlar la velocidad del motor con hélice de tal forma que a cada ángulo de rotación de una de las placas retardadoras le corresponde un ancho de pulso que controla la velocidad del motor colocando al péndulo-hélice a un ángulo fijo.

Palabras clave: Interferómetro, fibra óptica, control, péndulo-hélice, FPGA.

1. Introducción

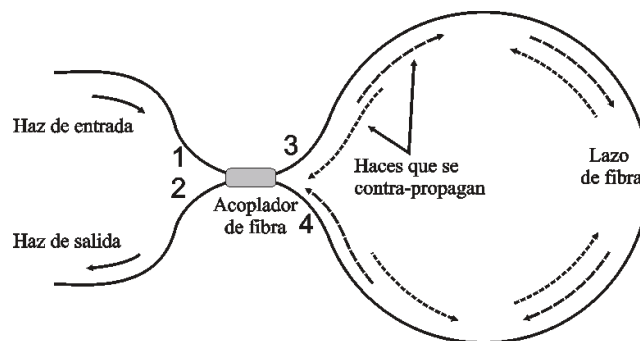


Figura 1. Esquema básico del interferómetro de Sagnac.



En la figura 1 se muestra el esquema básico del interferómetro de Sagnac de fibra óptica propuesto en 1981 por Bergh [1] y analizado en 1988 por Mortimore, este último muestra mediante ecuaciones matriciales su funcionamiento [2]. El esquema básico consta de un acoplador de fibra óptica de cuatro puertos con dos de los puertos (3 y 4) unidos por un lazo de fibra para formar un camino cerrado (lazo de fibra). Un haz de luz se introduce por uno de sus puertos y por las propiedades del acoplador, este se divide en dos haces que viajan en direcciones opuestas para entrar nuevamente al acoplador produciendo interferencia, cualquier diferencia de fase que adquieran los haces que se contra-propagan en el lazo producirán un cambio en el haz de salida. Dadas las características del interferómetro se ha propuesto como sensor de temperatura y rotación [3], sensor de temperatura [4], sensor acústico [5], en sistemas de monitoreo de fenómenos físicos rotacionales [6], como filtro selectivo de longitud de onda dentro de un sistema sensor de gas remoto [7], por mencionar algunas aplicaciones. Algunas investigaciones demuestran como una asimetría en polarización entre los haces contra propagándose puede proporcionar una diferencia de fase y producir una variación en la amplitud del haz de salida, hecho que fue demostrado por Kuzin [8]. Basándose en esto, O. Pottiez [9, 10] estudio una configuración del interferómetro Sagnac que incluye un acoplador simétrico, fibra altamente torcida en el lazo y una placa retardadora de fibra óptica de un cuarto de onda insertada en uno de los extremos del lazo demostrando que se puede ajustar fácilmente la amplitud del haz transmitido con tan solo rotar la placa. Pottiez [11] también empleó un haz de entrada polarizado circularmente y logró variar la amplitud del haz de salida en un rango amplio de valores ajustando solamente el ángulo de la placa retardadora de fibra. Nuestro trabajo retoma el esquema de Pottiez agregando una segunda placa retardadora en el lazo, ambas colocadas de manera simétrica en el lazo de fibra. Empleando como entrada al interferómetro un haz láser a 980 nm polarizado circularmente logramos variar con ambas placas retardadoras la amplitud de salida misma que conectamos a la entrada del convertidor analógico digital de la tarjeta FPGA Spartan 3E-1600. En esta se programó una máquina de estados como convertidor analógico digital y un modulador por ancho de pulso (PWM) de tal manera que al variar el ángulo de una de las placas, varía el ancho de pulso de la señal PWM que alimenta un motor provisto de una hélice suspendido en un péndulo (sistema péndulo-hélice), de tal forma que al rotar una placa el péndulo-hélice se posiciona a un determinado ángulo dependiendo la cantidad de grados que rote la placa. De particular interés es que al rotar la segunda placa retardadora el sistema péndulo-hélice regresa a su posición inicial, es decir, podemos lograr controlar la posición angular de un sistema péndulo-hélice con tan solo rotar las placas retardadoras de fibra óptica. Pensamos que nuestro esquema tiene futuras aplicaciones en sistemas de control de estabilidad o como sensor de posición angular.

2. Teoría del Interferómetro de Sagnac de fibra óptica con dos placas retardadoras

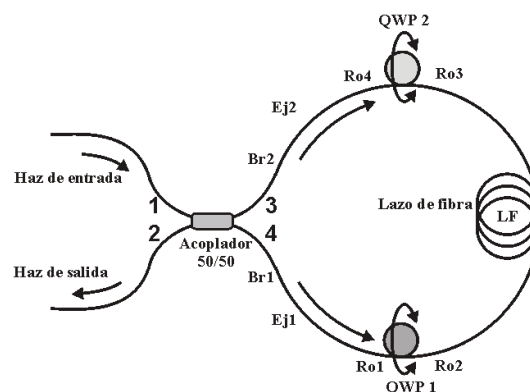


Figura 2. Interferómetro de Sagnac con dos placas retardadoras.



Retomando el trabajo de Pottiez [10, 11] colocamos una segunda placa retardadora de manera simétrica en el lazo del interferómetro. La figura 2 muestra el esquema del interferómetro propuesto. Se emplea un acoplador 50/50, dos placas retardadoras de un cuarto de onda QWP1 y QWP2, y fibra torcida en el lazo del interferómetro (FL). Para simular numéricamente el comportamiento del haz transmitido en relación con el grado de rotación de las placas retomamos el análisis numérico que realiza Ibarra [6]. Modelamos cada elemento que compone el lazo mediante matrices de Jones. En el esquema de la figura 2, Br1 y Br2 son las matrices que describen la birrefringencia y torsión de la fibra de los puertos 4 y 3 respectivamente modeladas mediante la matriz (1).

$$B_{ri} = \begin{pmatrix} \cos \eta_{Bi} - i(\delta_{l,Bi}/2) \operatorname{sen} \eta_{Bi} / \eta_{Bi} & (\delta_{c,Bi}/2) \operatorname{sen} \eta_{Bi} / \eta_{Bi} \\ -(\delta_{c,Bi}/2) \operatorname{sen} \eta_{Bi} / \eta_{Bi} & \cos \eta_{Bi} + i(\delta_{l,Bi}/2) \operatorname{sen} \eta_{Bi} / \eta_{Bi} \end{pmatrix}, i = 1,2 \quad (1)$$

Donde,

$$\eta_{Bi} = \sqrt{(\delta_{l,Bi}/2)^2 + (\delta_{c,Bi}/2)^2}, i = 1,2 \quad (2)$$

$(2\pi/\lambda)L_i\Delta n_i$ y $\delta_{c,B} = 2(1 - g/2n)\tau$ es la retardancia lineal y retardancia circular respectivamente, L_i es la longitud de los brazos, $\delta_{l,B}$ la birrefringencia lineal de la fibra, λ es la longitud de onda del haz de entrada, n es el índice de refracción de la fibra, τ es un ángulo de torsión de la fibra de los puertos 3 y 4 en la sección donde se acopla la fibra que forma el lazo. El parámetro g encierra la birrefringencia circular y la torsión de la fibra, para fibras de silicio puede tomar valores entre 0.13 - 0.16 [12].

E_{j1} y E_{j2} describen la orientación de los ejes principales de la fibra del acoplador con respecto a QWP1 y QWP2 respectivamente, θ_i es un ángulo no conocido que se tiene al momento de empalmar la fibra. E_{j1} y E_{j2} están descritas por (3).

$$E_{ji} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\operatorname{sen} \theta_i \\ \operatorname{sen} \theta_i & \cos \theta_i \end{pmatrix}, i = 1,2 \quad (3)$$

La matriz R_{oi} dada por (4), describe la rotación de las placas QWP, donde β_i es el ángulo de rotación de las placas.

$$R_{oi} = \begin{pmatrix} \cos \beta_i & -\operatorname{sen} \beta_i \\ \operatorname{sen} \beta_i & \cos \beta_i \end{pmatrix}, i = 1,2,3,4 \quad (4)$$

LF describe la matriz del lazo de fibra con birrefringencia y torsión, matriz (5).

$$LF = \begin{pmatrix} \cos \eta - \pi L_n \operatorname{sen} \eta / \eta & \delta_c / 2 \operatorname{sen} \eta / \eta \\ -\delta_c / 2 \operatorname{sen} \eta / \eta & \cos \eta + \pi L_n \operatorname{sen} \eta / \eta \end{pmatrix}, i = 1,2 \quad (5)$$

$\sqrt{(\pi L_n)^2 + (\delta_c/2)^2}$, donde L/L_b es la razón entre la longitud (L_f) y la longitud de repetición de la fibra (L_b); $2(1 - g/2n)\tau$ es la birrefringencia circular, n es el índice de refracción y τ es la torsión de la fibra. La longitud de repetición indica la longitud de fibra sin retorcer en que los modos linealmente polarizados ganan un corrimiento de fase de 2π [7]. Finalmente la matriz de la placa retardadora de un cuarto de onda QWPi está dada por (6).



$$QWP_i = \begin{pmatrix} \exp(i\pi/4) & 0 \\ 0 & \exp(-i\pi/4) \end{pmatrix}, i = 1, 2 \quad (6)$$

Por otra parte, la ecuación que describe el comportamiento del interferómetro en términos de los campos de entrada y salida y que nos permite analizar la dependencia que tiene el haz transmitido, -haz de salida por el puerto 2-, con la torsión de la placa está dada por [2].

$$\begin{pmatrix} E_{2x} \\ E_{2y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (2\alpha - 1)J_{xx} & (1 - \alpha)J_{xy} + \alpha J_{yx} \\ -\alpha J_{xy} - (1 - \alpha)J_{yx} & (1 - 2\alpha)J_{xx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix} \quad (7)$$

E_1 y E_2 son los campos de entrada y de salida respectivamente, α es el coeficiente de acoplamiento del acoplador y J es la matriz de Jones que puede ser calculada como el producto de las matrices correspondientes a cada elemento que forma el lazo del interferómetro como se aprecia en la figura 2.

$$J = B_{r1} \cdot E_{j1} \cdot R_{o1} \cdot QWP1 \cdot R_{o2}^{-1} \cdot LF \cdot R_{o3} \cdot QWP2 \cdot R_{o4}^{-1} \cdot E_{j2} \cdot B_{r2} \quad (8)$$

3. Simulaciones numéricas

Numéricamente mostramos la dependencia que tiene el haz transmitido con respecto al grado de rotación de las placas retardadoras QWPi. Para esto primero se coloca la placa QWP2 a un ángulo fijo, matriz (4) donde $\beta_i = \beta_3 = \beta_4$ en (6) y se hace rotar QWP1 $\beta_i = \beta_1 = \beta_2$.

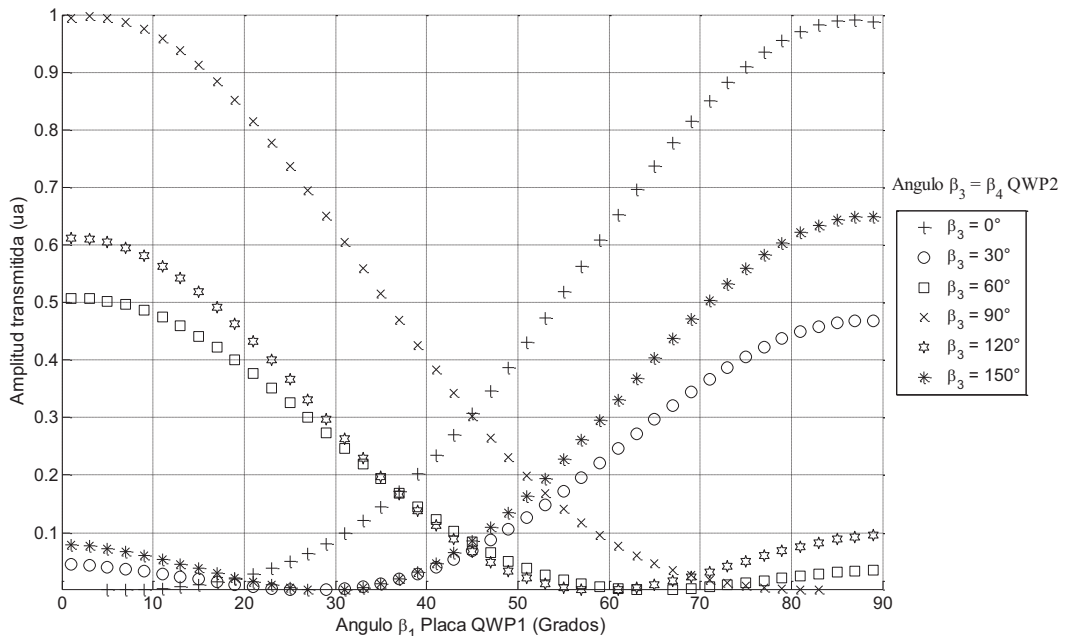


Figura 3. Comportamiento de la Amplitud de salida con respecto a la torsión de QWP1 para distintos ángulos QWP2.



La figura 3 muestra el comportamiento del haz transmitido por el puerto 2 con respecto al ángulo de rotación β_1 de la placa QWP1. En este caso se tomaron características idénticas en los brazos del interferómetro, tanto en longitud de estos como el grado de torsión y birrefringencia presentes en los mismos. Puede observarse que se obtiene una amplitud máxima cuando β_3 llega a un ángulo de 0 ó 90 grados. Y a medida que el ángulo de QWP2 toma valores intermedios, la amplitud decae a valores que pueden llegar a ser menores que el 50% de la máxima amplitud que se puede obtener. Se observa también que existe un intervalo de 20 a 50 grados en los que la amplitud marcada con "x" decae de manera lineal. De igual manera en el caso de la amplitud marcada con "+" en el intervalo de 40 a 70 grados. Un comportamiento idéntico se obtiene si ahora se deja fija la placa QWP1 y se rota QWP2.

Esta característica del comportamiento de haz transmitido resulta interesante pues experimentalmente podemos determinar la amplitud de salida y por lo tanto la posición angular de cualquiera de las dos placas, o por el contrario, si queremos una amplitud de salida, digamos de 0.7 u.a., debemos colocar QWP1 ≈ 62 grados y QWP2 = 90 grados ó QWP1 ≈ 28 grados y QWP2 = 0 grados. Podemos entonces decir que con ambas placas podemos controlar simultáneamente la amplitud de salida, esto es, por dar un ejemplo, si rotando una placa a partir de que tenemos 0.4 u. a. llegamos a un valor de 0.5 u. a., con la placa contraria podemos, idealmente, regresar exactamente la amplitud a su valor original, rotando la segunda placa en dirección contraria, siempre y cuando se tengan las mismas características en los brazos Br_1 y Br_2 . La figura 4 muestra como al girar ambas placas en direcciones contrarias a la misma velocidad se puede mantener la amplitud transmitida sin cambios, en este caso se simularon dos niveles de salida uno en 0 u. a. y otro en 0.25 u. a. (grafica superior).

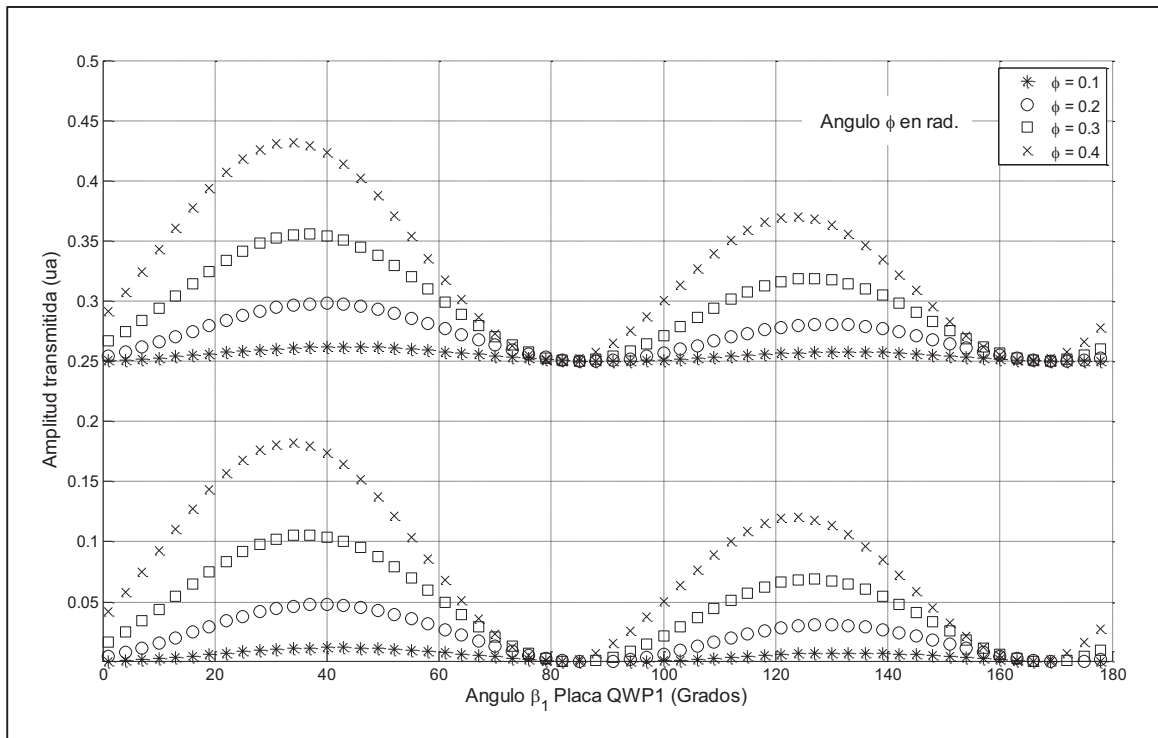


Figura 4. Amplitud transmitida contra ángulo de rotación de ambas placas tomando una diferencia de ϕ rad.

En ambas graficas se considera una diferencia de ϕ radianes como ángulo inicial de rotación entre las dos Placas, además de considerar que se rotan en direcciones contrarias con la misma velocidad. Esto es; colocamos ambas placas en 0 grados con respecto a los ejes de laboratorio pero



además a una de ellas le agrega un ángulo inicial ϕ ($\beta_1 + \phi$). En la figura se observa como al ir disminuyendo ϕ de 0.4 a 0.1 rad la amplitud de salida se vuelve casi invariante, si $\phi = 0$, la amplitud permanece constante. Esto parece muy atractivo para sistemas de control de estabilidad ya que el interferómetro de Sagnac de fibra tiene una alta sensibilidad a cambios producidos en el lazo.

4. Arreglo experimental

La figura 5 muestra el arreglo experimental propuesto. El interferómetro de fibra está formado por un acoplador 50/50, el lazo se formó con 5 metros de fibra estándar con una razón de torsión de 5 vueltas por metro.

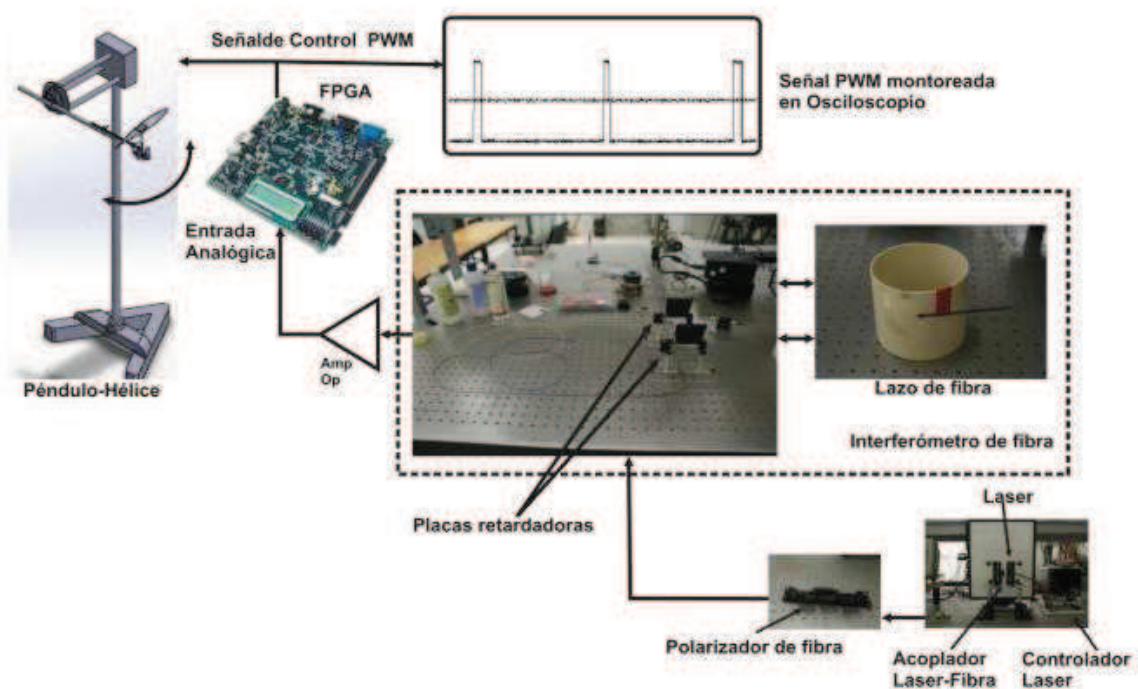


Figura 5. Arreglo experimental

A la entrada del interferómetro empleamos un láser a 980 nm acoplado a la fibra óptica, para tener un haz de luz polarizado circularmente se empleó un polarizador para fibra. Esto con el fin de poder obtener un mejor control de la polarización de los haces de luz que se contra-propagan en el lazo. La salida del interferómetro se conecta a un foto detector DET01CFC de InGaAs conectado a un amplificador operacional de acoplamiento cuya salida va conectada a la entrada analógica de la tarjeta FPGA Spartan 3E, en la que se programó un convertidor analógico digital mediante una máquina de estados y un módulo PWM que controla la velocidad del motor del sistema péndulo-hélice. La señal PWM se monitorea en un osciloscopio digital.

La tarjeta Spartan 3E cuenta con una interfaz periférica serial (SPI) con dos canales de captura analógica que constan de un circuito preamplificador programable y un convertidor ADC. El circuito de captura analógica convierte el voltaje de entrada, en nuestro caso del canal 1, que se localiza en el jumper J7 de la tarjeta, en una representación de 14 bits en complemento a dos [13]. La figura 6a muestra la implementación del hardware de alto nivel (top_nivel) con los módulos que se programaron en la tarjeta FPGA y sus interconexiones, puede observarse que del módulo de conversión analógica (Conv_Analog_Di) se toma la salida DatoPWM(13:0) de 14 bits para llevarlos a la entrada del módulo



PWM. Este módulo se programó haciendo uso de la máquina de estados finitos que se muestra en la figura 6b. En el estado “Inicio” se inicializan las señales tanto del amplificador programable como del convertidor (AMP_CS, SPI_SCK, SPI_MOSI y AD_CONV). En el estado “Ganancia” se implementa una rutina que manda una palabra de 8 bits formada por dos nibbles de 4 bits para configurar la ganancia del amplificador esto a través de SPI_MOSI de la tarjeta. En el estado “Conversión” se lee bit a bit el resultado de la representación digital de ambos canales analógicos mismos que son separados en el estado “Salida” en forma de dos palabras de 14 bits, tomamos únicamente los bits de la palabra de canal 1 para ser enviados al módulo PWM. En este módulo se implementa una rutina de conversión, de tal forma que a cada palabra de 14 bits corresponde un ancho de pulso. La razón de emplear la tarjeta Spartan 3E es porque a futuro se tiene pensado agregar más módulos al sistema como el LCD que viene incorporado en la tarjeta o uno externo para monitorear los resultados, más sin embargo, se puede utilizar cualquier otra tarjeta que permita procesar señales.

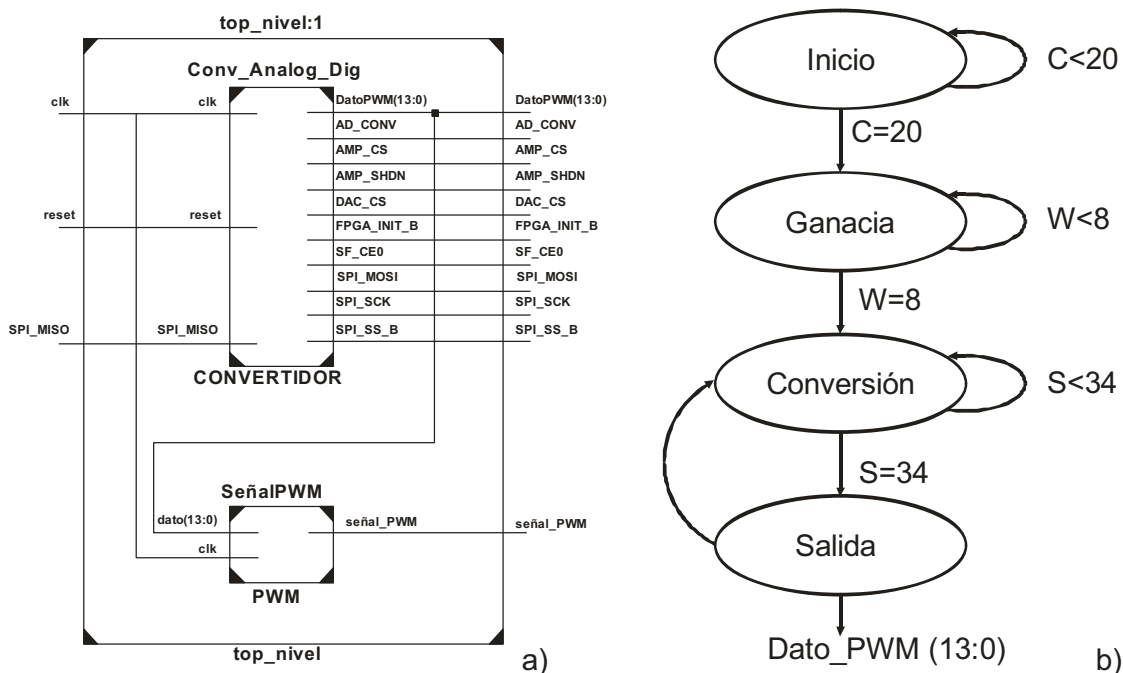


Figura 6. Módulos implementados en la FPGA y máquina de estados empleada en la conversión analógica a digital.

5. Análisis de resultados

La figura 7 muestra una comparación de entre los resultados experimentales y los obtenidos en las simulaciones descritas anteriormente en el apartado 3. Se puede observar la variación de la amplitud de salida del interferómetro dependiente de la rotación de una de las placas retardadoras. La línea en color claro es la gráfica experimental obtenida directamente del osciloscopio y corresponde a la imagen mostrada en la parte superior derecha. Para superponer ambas graficas se tuvo especial cuidado en el ángulo de rotación inicial de la placa retardadora con el fin de que ambas coincidieran y rotaran la misma cantidad de grados. En este caso se dejó fija una placa en aproximadamente 120° y se roto la otra un total de 180 grados. Se puede observar una gran similitud entre los resultados teóricos y los resultados experimentales. Cabe mencionar que la rotación de la placa retardadora se hizo de manera manual por lo que presenta un aspecto no uniforme.

La figura 8 muestra los cambios que se producen en el ancho de la señal PWM debido al cambio de amplitud del haz de salida del interferómetro producido por la rotación de una de las placas, en este caso QWP1. QWP2 permanece fija.

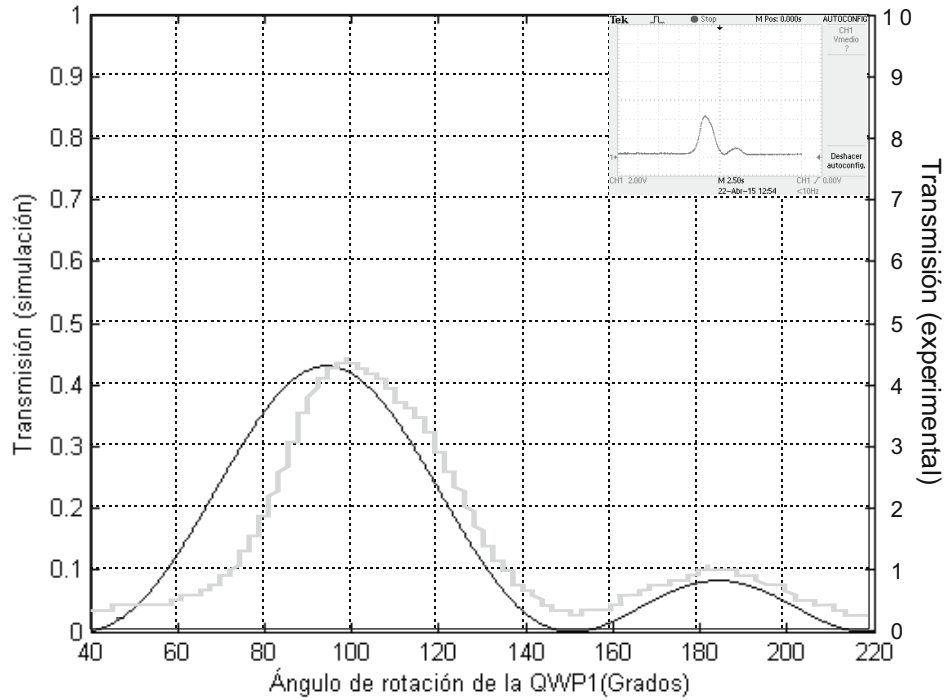


Figura 7. Variaciones de amplitud dependientes de la rotación de una placa retardadora, en color claro resultados experimentales y en negro resultados teóricos.

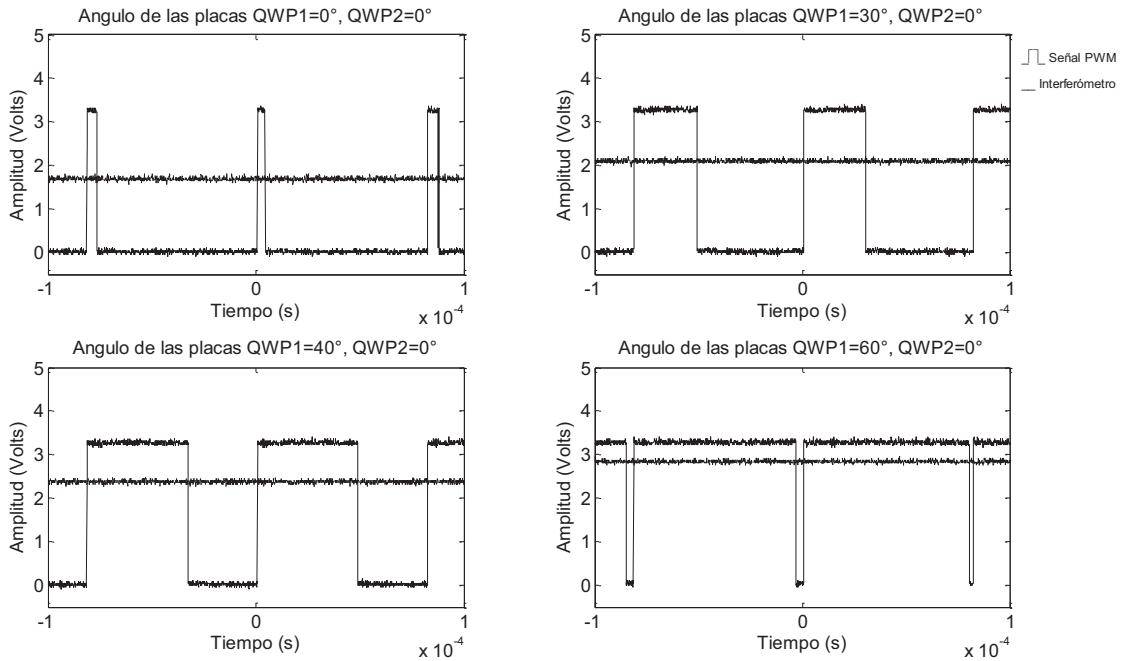


Figura 8. Señal de salida PWM dependiente del ángulo de rotación de QWP1.



En la figura, ambas placas se colocaron primero a un ángulo inicial de 0° con respecto a los ejes de laboratorio, a esta posición se tiene una amplitud, a la salida del interferómetro, de aproximadamente 1.7 volts que nos produce un ancho de pulso de $4.7 \mu\text{s}$ para una frecuencia PWM de 12.4 KHz. Esta frecuencia se programa en el FPGA y puede adecuarse según las características del motor a controlar. Únicamente cambia el ancho de pulso PWM dependiendo de la amplitud de la señal (salida del interferómetro) que entra al convertidor analógico-digital del FPGA.

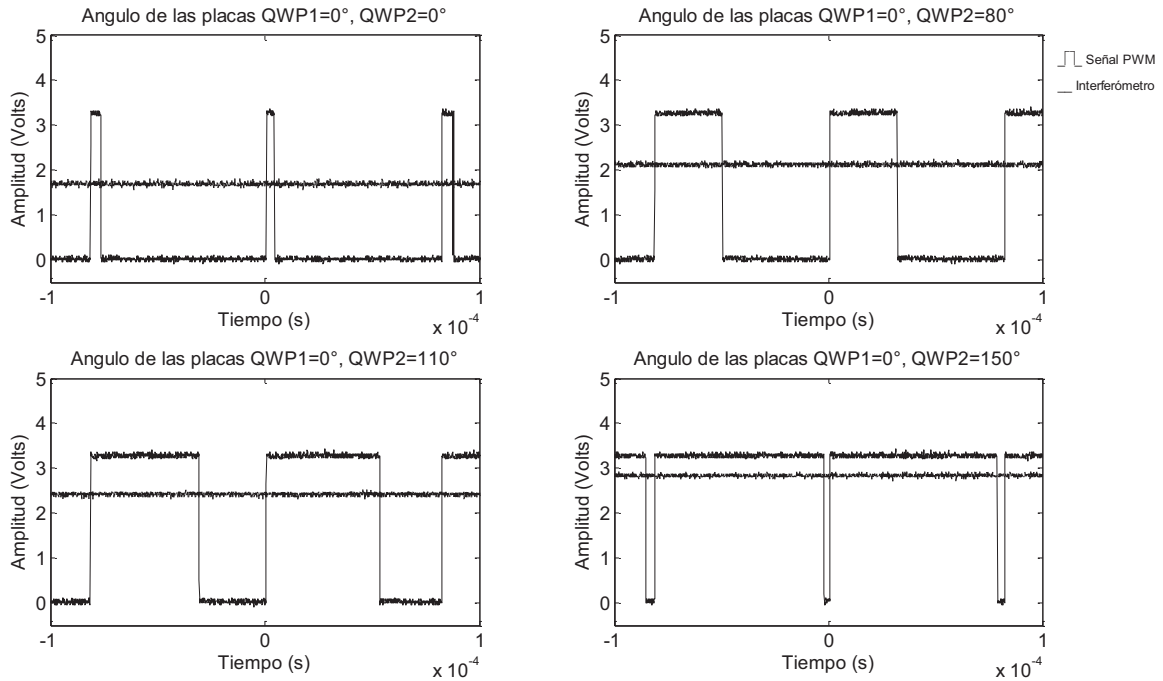


Figura 9. Señal de salida PWM dependiendo el ángulo de QWP2

Se observa claramente cómo va aumentando el ancho del pulso a medida que varía la amplitud de salida del interferómetro para cada ángulo que rota la placa QWP2. En la figura 8 podemos ver que para amplitudes de entrada de aprox. 2.1, 2.4 y 2.9 volts y ángulos de QWP2 de 30° , 40° y 60° tenemos un ancho de pulso de 30.5, 48.5 y $79.7 \mu\text{s}$ respectivamente. Por otra parte, la figura 9 muestra el efecto contrario, ahora de deja fija QWP1 y se rota QWP2, se observa un comportamiento bastante idéntico al anterior, se tienen amplitudes de 1.7, 2.12, 2.4 y 2.8 volts para ángulos de QWP2 de 0° , 80° , 110° y 150° respectivamente y con su correspondiente ancho de pulso de 4.7, 31.6, 50.6 y $79.2 \mu\text{s}$. En este caso, para alcanzar el mayor ancho de pulso se tiene un mayor recorrido angular de 0° a 150° , que en el caso anterior fue de 0° a 60° . Esto era de esperarse pues es muy difícil tener condiciones idénticas en los brazos del interferómetro, que de ser así, tendríamos exactamente los mismos resultados rotando las placas retardadoras como lo hicimos anteriormente.

6. Conclusiones

Presentamos un sistema basado en el interferómetro de Sagnac de fibra óptica con dos placas retardadoras de un cuarto de onda, para controlar la posición angular de un péndulo-Hélice. El sistema basa su funcionamiento en los cambios que se producen en la señal de salida debido a la rotación de las placas retardadoras. Experimentalmente observamos una alta sensibilidad en el lazo del interferómetro y una rápida respuesta a los cambios producidos al rotar las placas retardadoras.



Observamos además, que teniendo las mismas condiciones en los brazos del lazo del interferómetro se puede obtener una operación ideal, esto es, se puede obtener el mismo ancho de pulso rotando cualquier placa el mismo ángulo. Podemos configurar el arreglo de tal manera que el péndulo-hélice se desplace la misma cantidad de grados que la placa retardadora, ajustando tanto las características de los brazos del interferómetro como la frecuencia de la señal PWM. Esto es de interés ya que si acoplamos la placa retardadora al eje de giro del péndulo podemos determinar, midiendo la amplitud de salida, el desplazamiento angular del mismo. Otra característica interesante que muestra este sistema es que si logramos tener las mismas condiciones en los brazos del interferómetro (longitud de fibra, torsión, birrefringencia), podemos mantener sin cambios la amplitud de salida aun cuando las placas retardadoras estén rotando pero con la condición de que roten a la misma velocidad y en direcciones contrarias. Pensamos que si logramos esto último y acoplando las placas retardadoras a un sistema de control retroalimentado podemos lograr con este diseño un sistema con gran estabilidad debido a la alta sensibilidad del interferómetro. Por otro lado, si suspendemos en el aire parte de la fibra que forma los brazos del interferómetro, observamos que se producen variaciones de amplitud debido a pequeños movimientos que siente la fibra, por lo que es necesario, mantenerla fija.

Referencias

- [1] Bergh R. A., Lefevre H. C. and Shaw H. J. "All single mode fiber optic gyroscope", *Optics Letters*. Vol. 6, 4, 198-200, 1981.
- [2] Mortimore D. B. "Fiber loop reflectors", *Journal of Lightwave Technology*. Vol. 6, 1217-1224, 1988.
- [3] Li-Yang Shao , Xinpu Zhang , Haijun He, Zhiyong Zhang, Xihua Zou, Bin Luo, Wei Pan and Lianshan Yan. "Optical Fiber Temperature and Torsion Sensor Based on Lyot-Sagnac", *Sensors*, Vol. 16, 1774, 2016.
- [4] Kok-Sing L., Iman A., Wu-Yi Ch., Yew-Ken Ch., Sulaiman W. H. and Harith A. "Integrated Microfibre Device for Refractive Index and Temperature Sensing", *Sensors*, Vol. 12, 11782-11789, 2012.
- [5] Lutang W., Nian F., Chunxu W., Haijuan Q. and Zhaoming H. "A Fiber Optic PD Sensor Using a Balanced Sagnac Interferometer and an EDFA-Based DOP Tunable Fiber Ring Laser", *Sensors*, Vol. 14, 8398-8422, 2014.
- [6] Kurzych A., Jaroszewicz L. R., Krajewski Z., Teisseyre K. P. and Kowalski J. K., "Fibre Optic System for Monitoring Rotational Seismic Phenomena", Vol. 14, 5459, 2014.
- [7] Shi J., Wang Y., Xu D., He Y., Jiang J., Xu W., Zhang H., Su G., Yan Ch., Yan D., Lu Y. and Yao J. "Remote Gas Pressure Sensor Based on Fiber Ring Laser Embedded With Fabry-Pérot Interferometer and Sagnac Loop", *IEEE Photonics Journal*. Vol. 8, No. 5, 2016.
- [8] Kuzin E. A., Korneev N., Haus J. W., and Ibarra B. "Theory of nonlinear loop mirrors with twisted low-birefringence fiber", *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 18, 919-925, 2001.
- [9] Pottiez O., Kuzin E. A., Ibarra B. and Mendez F. "Easily tuneable nonlinear optical loop mirror including low-birefringence, highly twisted fibre with invariant output polarisation", *Opt. Commun.* Vol. 229, 147-159, 2004.
- [10] Pottiez O., Kuzin E. A., Ibarra B., Camas J. T. and Gutiérrez F. "Experimental demonstration of NOLM switching based on nonlinear polarisation rotation", *Electron. Lett.* Vol. 40, 892-894, 2004.
- [11] Pottiez O., Kuzin E. A., Ibarra B., Camas J. T. and Gutiérrez F. "Easily tunable nonlinear optical loop mirror based on polarization asymmetry", *Optic Express*, Vol. 12, 3878-3887, 2004.
- [12] McIntyre P., Snyder A. W., "Light propagation in twisted anisotropic media: application to photoreceptors", *J. Opt. Soc. Am.* Vol. 68, 2, 149-157, 1978.
- [13] Xilinx, "MicroBlaze Development Kit Spartan-3E 1600E Edition User Guide", UG257 (v1.1) December 5, 2007.