

# SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES COHERENTES POR FIBRAS ÓPTICAS MONOMODO CON MODULACIÓN BINARIA DE POLARIZACIÓN CIRCULAR (CPOLSK)

*Samuel A. Jaramillo Flórez, Alberto Posada S. y Andrés Rendón*

Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana y Facultad de Ingenierías de la Universidad de San Buenaventura, Medellín, Apartado Aéreo 56006, Colombia

## RESUMEN

Se analiza el desempeño del sistema de modulación óptica coherente usando el estado de polarización de la luz como parámetro de modulación (CPolSK, Circular POLarization Shift Keying) en presencia del ruido de fase del láser. Incluimos la simulación que muestra como trabaja este tipo de modulación.

## 1. INTRODUCCIÓN

Existen dos problemas que dificultan la realización de sistemas ópticos coherentes: (1) El ruido de fase del láser y (2) Las fluctuaciones del estado de polarización (SOP) del campo eléctrico a la salida de una fibra óptica monomodo [1]. Como una alternativa a las técnicas estándar de modulación coherente como ASK, DPSK, FSK y DPSK se tienen los métodos que explotan las características vectoriales de la radiación y propagación de la luz [2]. Estos métodos utilizan el estado de polarización (SOP) de una onda totalmente polarizada como la información que se parametriza [3], es decir, se enfrenta el problema usando un receptor con diversidad de polarización. Estas técnicas han sido llamadas en la literatura con el nombre de “Modulación por Conmutación de la Polarización” PolSK (de las siglas en inglés de POLarization Shift Keying). En vez de controlar las fluctuaciones del SOP, que de hecho siempre existen, se trata de producir fluctuaciones determinadas de SOP en el terminal del transmisor de la fibra (modulación de SOP) para transmitir una información específica que será entendida mediante una detección apropiada en el receptor. Esta modulación recibe el nombre de PolSK. Existen varias formas de modulación PolSK, entre las que se puede enunciar: CFS-DPolSK, PolSK - PNRHS, DFP-PolSK, y DSPSK[3]. Uno de los esquemas PolSK con que se logra insensibilidad a las fluctuaciones aleatorias del SOP es la modulación por polarización circular (CPolSK) que será la tratada en este artículo.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Los sistemas de comunicaciones binaria PolSK convencionales hacen la modulación mediante un cambio entre dos posiciones ortogonales del plano de polarización del campo eléctrico de la luz que se envía a través de la fibra óptica monomodo. El sistema CPolSK utiliza una onda de luz polarizada circularmente como portadora de información digital, siendo su sentido de rotación lo que determina el bit que se está transmitiendo (hacia la derecha '1' y hacia la izquierda '0').

## 2.1 El Transmisor

Para modular circularmente, se requiere una modulación previa de PSK de una onda polarizada linealmente a  $45^\circ$  (con respecto a los ejes X,Y del prisma divisor de haz Glan Taylor PGT) y que se pasa posteriormente a una placa retardadora  $\lambda/4$ . El haz láser entra entonces en el prisma PGT que lo separa en componentes ortogonales con polarización lineal a  $45^\circ$ . El prisma lo divide en dos haces polarizados linealmente a  $45^\circ$ . El haz directo, queda así polarizado horizontalmente y entra en el modulador de fase. Al modulador de fase llega la señal de los datos (binarios en este caso 1's y 0's), los cuales son amplificados y de acuerdo al voltaje de control de este, según el estado lógico, se le cambia la fase en rad. si es un uno o no se le cambia si corresponde a un cero. El haz indirecto, que queda polarizado verticalmente como se muestra en la Fig. 1, se superpone con el modulado (directo) con los espejos, lo que da dos estados de polarización lineales (uno a  $-45^\circ$  para el '1' y otro a  $+45^\circ$  para el '0'). Por último, este haz conformado por los dos anteriores pasa por una placa  $\lambda/4$  que produce un nuevo cambio de fase  $\lambda/2$  rad. en una sola componente de polarización, obteniéndose así los estados de polarización circular que corresponden al '1' si la polarización es a la derecha y '0' si la polarización es a la izquierda.

## 2.2 El Receptor

En el receptor se utiliza un prisma Wollaston ( $PW0^\circ$ ) que se encarga de dividir en dos componentes iguales el haz que entra. Dichos haces se hacen incidir en los fotodiodos D1 y D2, que generan señales eléctricas  $S_{cx}$  y  $S_{cy}$  de frecuencia intermedia. La primera se introduce en un detector de fase por correlación mientras que la segunda se usa para el control del SOP a la salida de la fibra óptica monomodo. El bloque GR es un generador utilizado para producir la señal de referencia. DF es un detector de fase. DL es un circuito de decisión con umbral cero. Y, finalmente, DE es el detector de envolvente cuya entrada es la señal  $S_{cy}$ .

## 3. ANÁLISIS DE SEÑAL Y RUIDO

Sean  $E_{sc}$  y  $E_{lc}$  las componentes del campo eléctrico de la señal y del láser local respectivamente antes de mezclarse en el espejo semitransparente de la Fig. 2:

$$\overline{E}_{sc} = \sqrt{\frac{P_S}{2}} e^{j(w_1 t + \phi_1(t))} x + \sqrt{\frac{P_S}{2}} e^{j(w_1 t + \phi_1(t))} y \quad (1)$$

$$\overline{E}_{LC} = \sqrt{\frac{P_L}{2}} e^{j(w_2 t + \phi_2(t))} x + \sqrt{\frac{P_L}{2}} e^{j(w_2 t + \phi_2(t))} y \quad (2)$$

$$j(t) = [1 - 2b_k(t)] \frac{\rho}{2}, b_k(t) = 0,1 \quad (3)$$

donde  $\phi(t)$  es la fase que representa la información transmitida,  $P_S$  es la potencia del láser transmisor,  $w_1$  es la frecuencia angular de la portadora óptica,  $\phi_1(t)$  representa el efecto del ruido de fase del láser transmisor,  $P_L$  es la potencia del láser local y  $w_2$  es la frecuencia angular de la luz emitida por el láser local. Los campos dados por la (1) y la (2) se combinan antes del prisma Wollaston ( $PW0^\circ$ ) y en este, se separan las componentes en X y Y ya que es un divisor de haces ortogonales, obteniendo:

$$\overline{E}_{cy} = \sqrt{\frac{P_S}{2}} e^{j[w_1 t + j_1(t)]} + \sqrt{\frac{P_L}{2}} e^{j(w_2 t + \rho/2)} \quad (4)$$

$$\overline{E}_{cx} = \sqrt{\frac{P_S}{2}} e^{j[w_1 t + j_1(t) + \phi(t)]} + \sqrt{\frac{P_L}{2}} e^{j(w_2 t + \rho/2)} \quad (5)$$

y las señales de IF, después de los fotodiodos son:

$$S_{cx} a |E_{cx}|^2 a \sqrt{P_S P_L} \text{Cos}(W_{FI} t + j_1(t)) - \frac{\rho}{2} \quad (6)$$

$$S_{cy} a |E_{cy}|^2 a \sqrt{P_S P_L} \text{Cos}(W_{FI} t + j_2(t)) \quad (7)$$

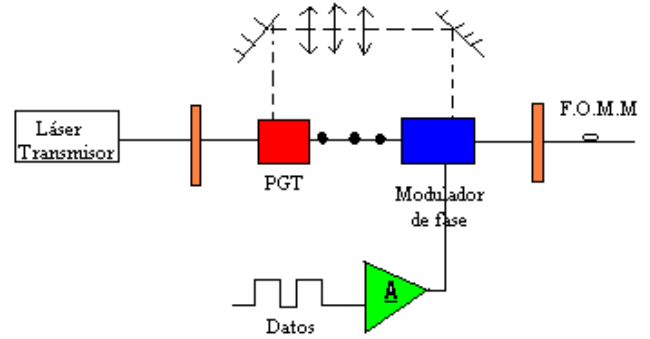


Fig.1. Esquema del transmisor CPOLSK. Modulación binaria. donde

$$j_{12(t)} = j_1(t) - j_2(t) \quad (8)$$

$$W_{FI} = W_1 - W_2 \quad (9)$$

El voltaje de la señal de entrada en el detector de fase es:

$$V_k(t) = [1 - 2b_k(t)] R_s \sqrt{P_S P_L} * \text{Cos}[W_{FI} t + j_{12}(t)] + n(t) \quad (10)$$

donde  $n(t)$  es el ruido gaussiano y  $R_c$  representa la respuesta de cada canal (Respuesta del fotodiodo por amplificación). La (10) hace considerar una referencia imperfecta en un receptor con detección por correlación, como si estuviera representada por la forma:

$$V_k(t) = \pm A \text{cos}(W_{or} t + \hat{\theta}) \quad (11)$$

donde  $\theta(t)$  es la fase del voltaje y  $\hat{\theta}(t)$  es el valor estimado de la fase en el receptor, siendo  $A$  la amplitud del voltaje.

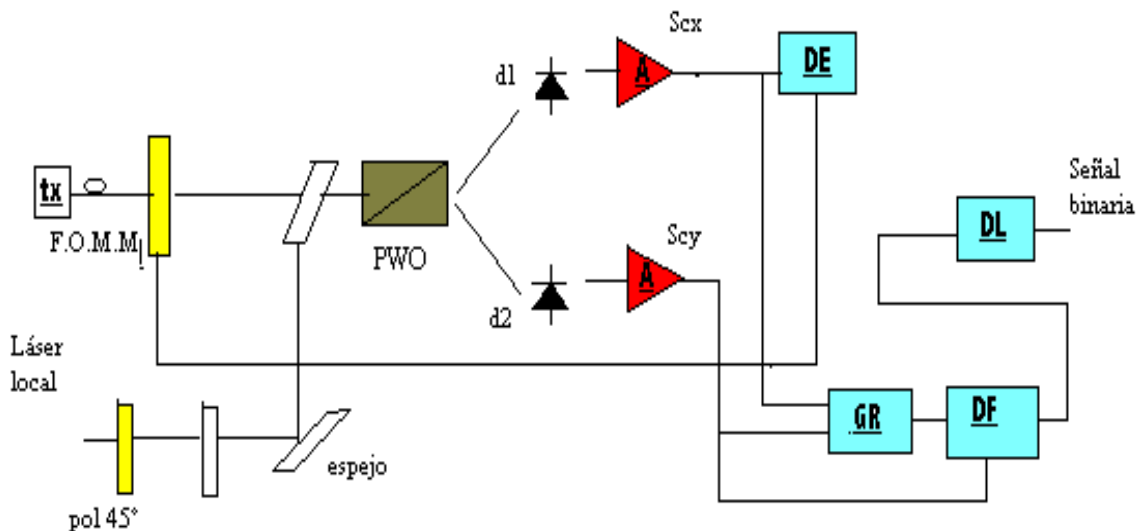


Fig.2 Esquema del receptor CPOLSK. Detector de envolvente : DE. Generador de señal de referencia : GR. Detector de fase por correlación : DF. Detector de umbral : DL.

Por último, la relación señal/ruido para este sistema CPolSK se calcula con la siguiente ecuación:

$$g = \frac{R_c^2 T^2 P_s P_L}{2S^2} \cos j \quad (12)$$

donde  $\sigma^2$  es la varianza del proceso de ruido y  $\varphi = \theta - \theta' = \varphi_{12} - \theta'$ . Puede observarse de la ecuación para  $\gamma$  que la relación señal a ruido depende de  $\varphi_{12}$  con  $\varphi_{12}(t) = \varphi_1 - \varphi_2$ . Esta diferencia entre los ruidos de los láser se llama ruido de fase de portadora, con ancho de banda B y tasa de bits transmitidos R. En condiciones de fuerte coherencia,  $R/B \gg 1$ , significando esto que  $\varphi$  es constante en un período de FI, [5]. Por ello, en este caso, puede considerarse la relación Señal/Ruido independiente del tiempo.

#### 4. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

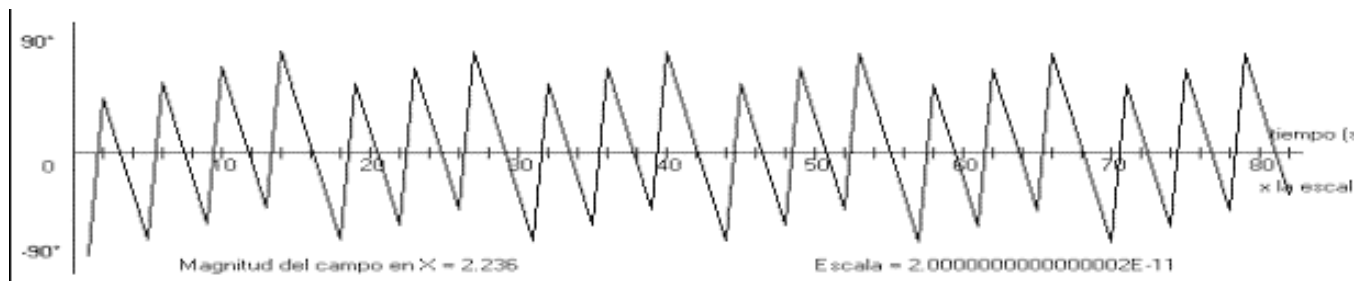
Se estudiaron las diversas fases del sistema, haciendo énfasis en el tratamiento de las señales y se enfocó el análisis en la relación señal a ruido (S/N), culminando con una simulación orientada a Internet sobre el sistema transmisor - receptor. Se ha realizado una simulación en un lenguaje de programación de alto nivel de plataforma universal que permite la visualización en forma interactiva del proceso de modulación CPolSK, mediante un computador y una conexión a Internet. Para la simulación se han tomado todas las señales que intervienen en el proceso de comunicación óptica coherente por modulación binaria de polarización, tomando como referencia los datos suministrados por el diseñador (o persona que realice la simulación) en cuanto a tasa de bits, longitudes de onda, anchos de banda, eficiencias y potencias. El programa se encarga entonces de calcular los datos de acuerdo a las anteriores ecuaciones y generar las gráficas en las que se muestran la fase del campo eléctrico de la señal con sus componentes en X y Y y se indica su magnitud (aproximadamente constante en presencia de un nivel medio de ruido), la fase del campo eléctrico del láser local en sus componentes X y Y, magnitud y fase de los haces ortogonales a la salida del prisma Wollaston (PW0°), la señal de entrada al detector de fase y la señal amplificada a la salida del detector de fase tanto en su componente en X como Y. Por último, se muestra la señal de salida del detector de umbral, la cual es comparada finalmente con la señal binaria con la que el usuario pone a prueba el sistema, comprobando así su demodulación. Las gráficas que se muestran a continuación corresponden a la simulación con parámetros en los rangos adecuados y que permiten una buena visualización de resultados. Así, la velocidad de transmisión es 500 Mbps, la longitud de onda de portadora de transmisión es de 1.3 $\mu$ m y su ancho de banda espectral, 0.2 $\mu$ m. la longitud de onda de portadora de láser local es de 1.3 $\mu$ m y su ancho de banda espectral, 0.3 $\mu$ m. La potencia del Láser de transmisión y recepción son ambas de 10 dBm. Por último, la eficiencia de los detectores se toma del 100% y los datos de la señal modulada son 11010 desde el bit 0 al bit 1. La Fig. 3 muestra la

señal de entrada del transmisor en su componente X, donde se grafica sólo la fase, dejando indicada la magnitud debido a que su valor es constante. La Fig. 4 muestra la señal de entrada en su componente en Y bajo las mismas consideraciones anteriores. En ambas, los máximos y mínimos corresponden a 90° y -90°, aunque no se logre ver bien debido a la resolución de la gráfica. Sin embargo, tomando una tasa de bit mayor, es posible ver la variación correcta. Entre las dos figuras se puede apreciar un desfase de 90° conforme lo indican (1), (2) y (3). La Fig. 5 muestra la magnitud en el prisma PW0° en su componente en X de la señal que entra al mismo, es decir, la señal cuyo resultado es la suma vectorial y compleja de las señales del láser local y la señal de portadora láser de transmisión que lleva la información. Se puede ver el cambio abrupto en la componente en X debido al cambio de bit (aprox. en 32 pasos de la escala y luego en 48) ya que la componente en X es la que lleva la información, mientras que si se mira la Fig. 7, la componente en Y, no presenta variaciones en su magnitud ya que esta representa una referencia o señal que no varía con el estado de los bits.

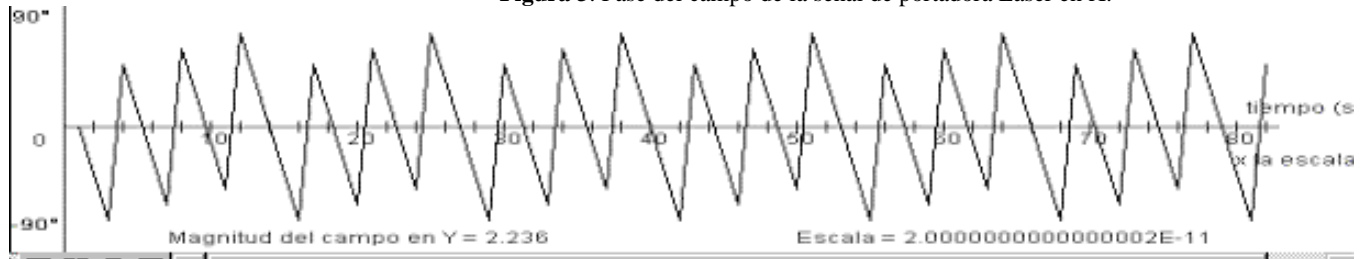
La Fig. 6 muestra la fase de la señal antes de entrar en el prisma PW0°, presentándose un desfase de 90° que es fácilmente apreciable en la gráfica ya que corresponde a la mitad de la escala en. Las Figs. 7 y 8 muestran la magnitud y fase de la componente en Y de la señal antes del prisma PW0° que no llevan información y por ello no tiene cambios bruscos en su forma. Esta señal es una referencia que se utiliza en el demodulador. La (4) y la (5) definen completamente el funcionamiento del prisma Wollaston, divisor de haces ortogonales. Las Figs. 5 y 7 que muestran las magnitudes de las componentes se ven distintas debido a que las frecuencias de las señales de portadora de señal de información y de láser local son diferentes y no son uniformes porque a que el muestreo que se hace de la señal en el programa diseñado no es muy eficiente, ya que haría su ejecución demasiado lenta.

Las Figs. 9 y 10 simplemente muestran la señal amplificada a la salida del prisma y los respectivos amplificadores, de tal manera que es aquí donde puede verse el efecto de la eficiencia en los fotodetectores de acuerdo a los niveles de señal que se obtiene. De acuerdo a su valor (en este caso con eficiencia del 100%) y comparándolo con otra gráfica de iguales parámetros pero diferente eficiencia se puede hallar el valor de la amplificación de las señales de salida  $S_{cx}$  y  $S_{cy}$ . Luego se muestran las gráficas de entrada al detector de fase (Figs. 11 y 12) que, si se miran con detenimiento, se notará que la primera corresponde a la misma señal  $S_{cx}$  de la Fig. 9, como está especificado en la Fig. 2 esquemática del receptor, mientras que la Fig. 12 es la salida del generador de referencia, cuya forma indica la presencia de las dos señales ( $S_{cx}$  y  $S_{cy}$ ). Por último, las dos señales anteriores entran al detector de umbral, que decide si el nivel de señal es suficiente y permite la salida del sistema que, como se muestra, corresponde a la señal binaria de entrada.

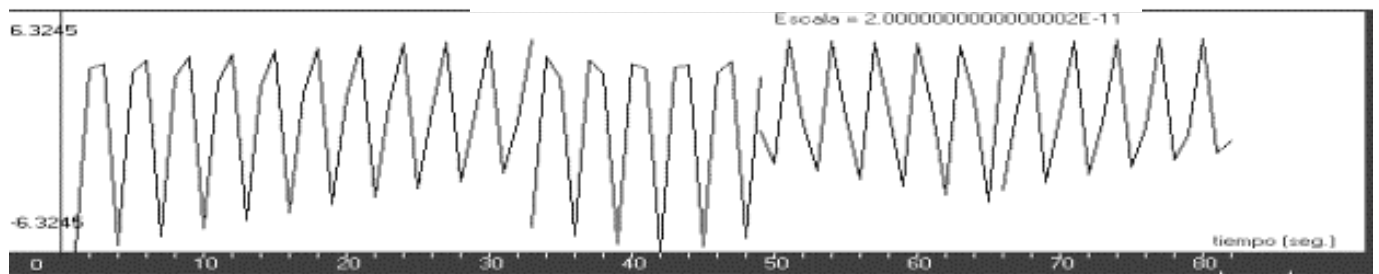
En la simulación hay algo más que puede apreciarse y que sólo se alcanza a visualizar levemente en las gráficas y corresponde al ruido existente en la señal por el ancho de banda espectral de los dos láseres que hace que las gráficas presenten un movimiento que depende de su magnitud.



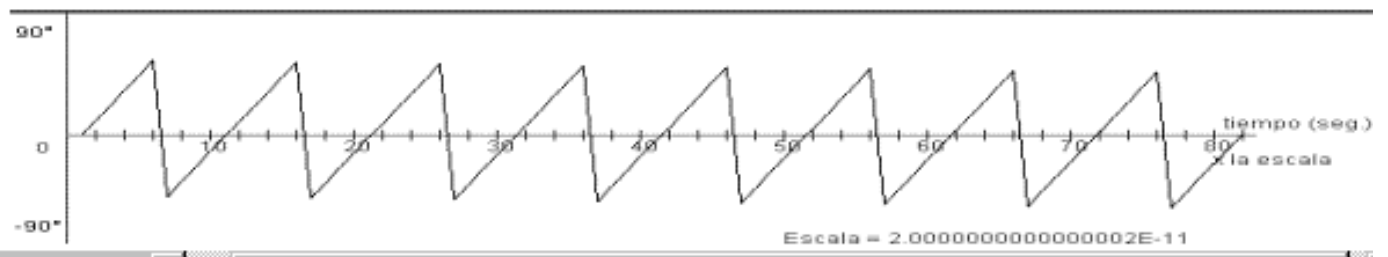
**Figura 3.** Fase del campo de la señal de portadora Láser en X.



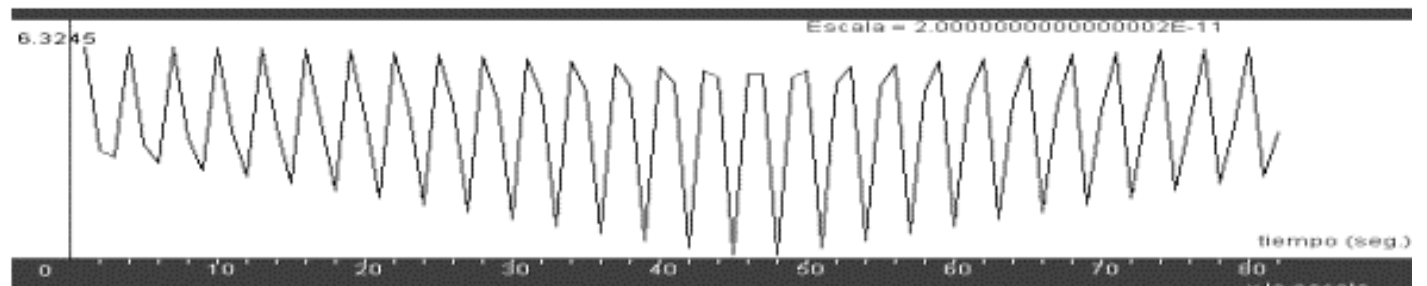
**Figura 4.** Fase del campo de la señal de portadora Láser en Y.



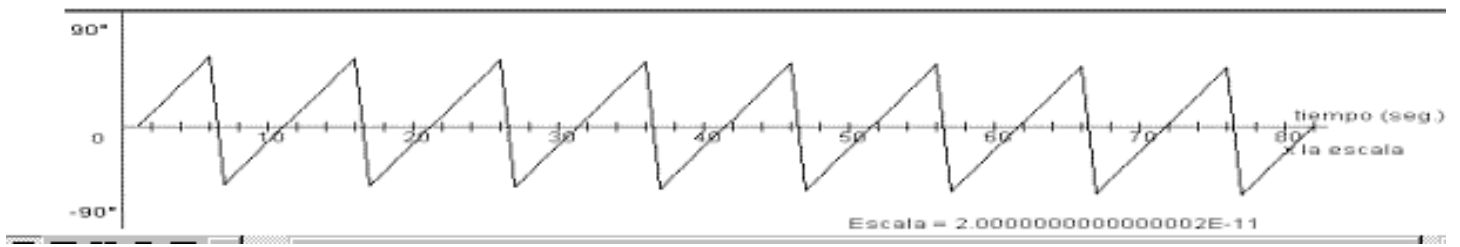
**Figura 5.** Magnitud de la señal antes del prisma  $PW0^\circ$  (en X).



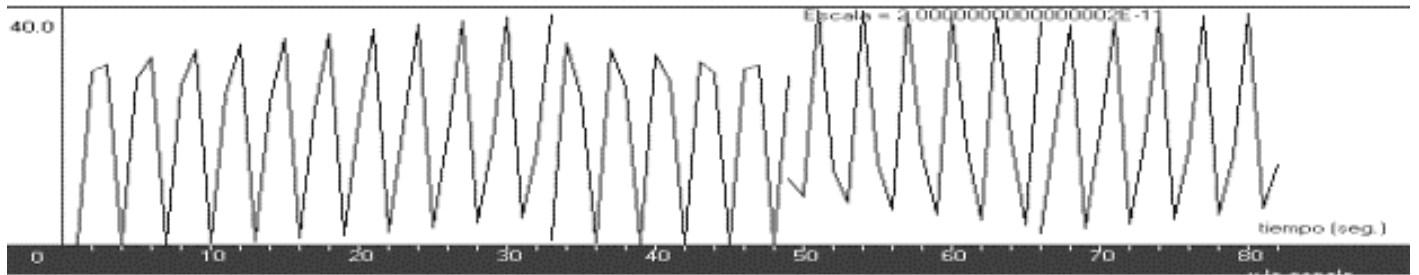
**Figura 6.** Fase de la señal antes de  $PW0^\circ$  (componente X).



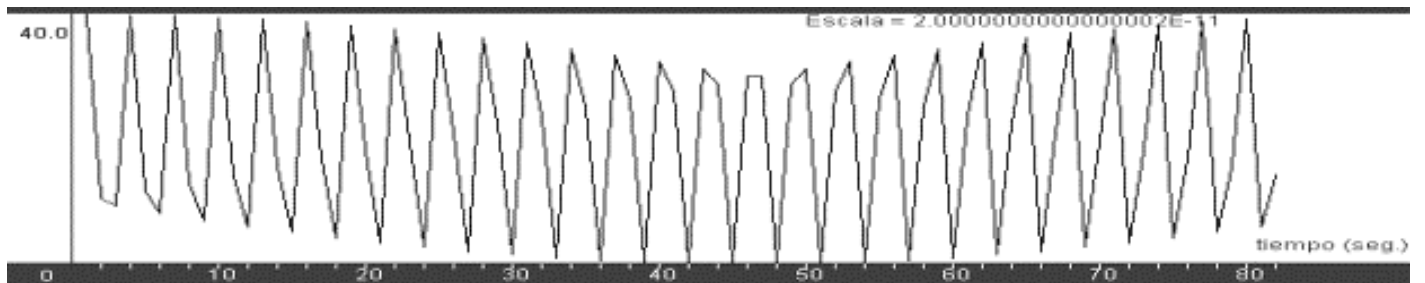
**Figura 7.** Magnitud de la señal que entra al prisma  $PW0^\circ$  (en Y).



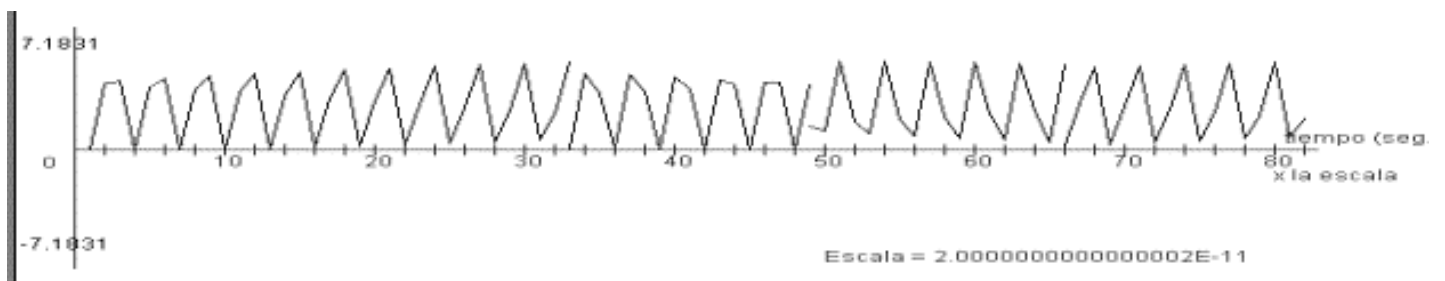
**Figura 8.** Fase de la señal que entra al prisma PW0° (en Y).



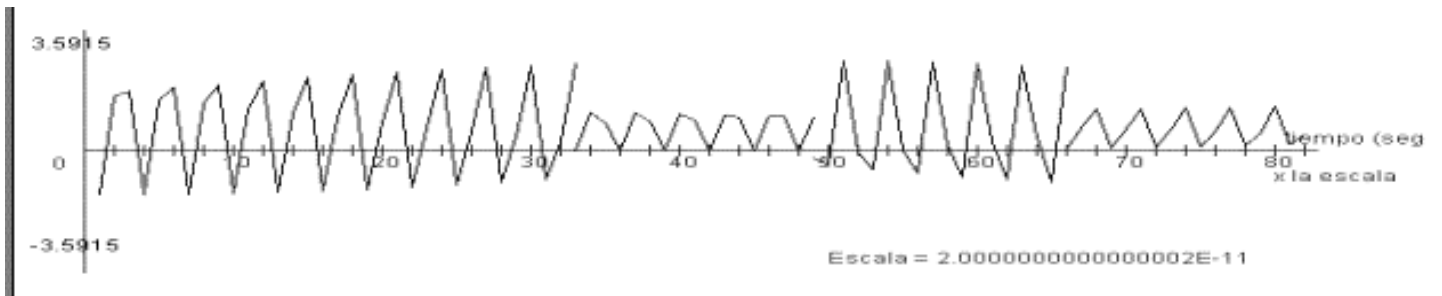
**Figura 9.** Magnitud de señal amplificada S<sub>cx</sub> a la entrada del generador de referencia.



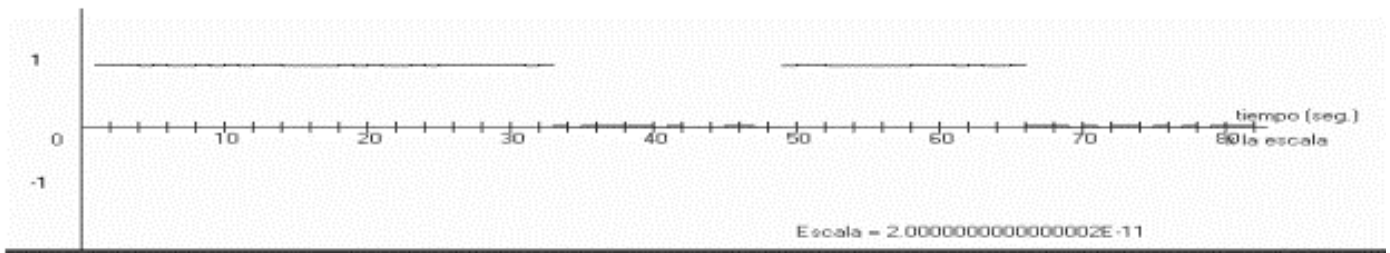
**Figura 10.** Magnitud de señal amplificada S<sub>cy</sub> a la entrada del generador de referencia.



**Figura 11.** Señal de entrada al detector de fase (S<sub>cx</sub>).



**Figura 12.** Señal de entrada al detector de fase (del generador de referencia).



**Figura 13.** Señal de salida detector de umbral y del sistema en general.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha modelado computacionalmente el comportamiento de las señales en un sistema de comunicaciones por fibras ópticas monomodo con modulación CPolSK, permitiendo corroborar su desempeño y sacar importantes conclusiones en base a comparaciones de acuerdo a los datos suministrados por el programa. Se ha observado de una manera detallada la respuesta que presenta la fibra óptica monomodo ante dicha modulación. Esta nueva técnica, [1],[3],[6] abre grandes posibilidades en el campo de las comunicaciones ópticas coherentes debido a que las señales de información no son afectadas por las fluctuaciones del estado de polarización dentro de la fibra.

## 6. RECONOCIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por COLCIENCIAS de Colombia, y por las Universidades Pontificia Bolivariana y San Buenaventura de Medellín, Colombia. Los autores desean agradecer a los Ingenieros Jhon Jairo Bolivar, Cesar M. Ortiz, y Julio Cesar Toro por su colaboración en el desarrollo de la simulación computacional y experimental.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Jaramillo. S. "Sistema de comunicaciones coherentes por fibras ópticas monomodo con modulación binaria de polarización circular -CPolSK-", *Optica Pura y Aplicada*, Madrid, España, Vol.26, no.2, , 1993, páginas.352-358.
- [2] Benedetto S. y Poggiolini, P., "Performance of coherent optical polarization shift keying modulation in the presence of phase noise", *IEEE Transactions on Communications*, vol.43, no.2/3/4, , February/March/April, 1995, páginas 1603-1611.
- [3] Jaramillo, S., Fragassi, R. y Moschim. E., "Sistemas de comunicações coherentes por fibras ópticas monomodo com modulação binaria da polarização circular - CPolSK", *Congreso Brasileiro de Telecomunicaciones*, Brasilia, Brasil,. 1992, páginas.1-15.
- [4] Benedetto, S. , Olmo, G., "Trellis coded polarization shift keying modulation for digital optical communications". *IEEE Transactions on Communications*, vol.43, no.2/3/4, February/ March/April, 1995, páginas.1603- 1611.
- [5] Jaramillo, S.. "Comunicações coherentes por fibras ópticas monomodo com modulação binaria da polarização circular-2PolSK", *Tesis de Maestría*, Universidad de Campinas, (UNICAMP), Campinas, SP, Brasil, 1991.
- [6] Jaramillo, S., Posada, A. y Gutierrez, J., "Desarrollo y evaluación de una simulación para sistemas de comunicaciones coherentes por fibras ópticas monomodo con modulación binaria de polarización circular -CPolSK-", *Optrónica, Fotónica y Electromagnetismo*, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, Vol. 1, No.2, , 2000, páginas. 1-9.