

## Caracterización de una señal pulsada propagándose en fibra óptica

J.L. Camas-Anzueto<sup>\*,a</sup>, H.H. Cerecedo-Núñez<sup>b</sup>, E.A. Kuzin<sup>a</sup>, S. Mendoza-Vazquez<sup>a</sup>,

<sup>a</sup>*Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica  
Apartado Postal 61 y 216, 72000 Puebla, Pue. México.*

<sup>\*</sup>*e-mail: caman@inaoep.mx*

<sup>b</sup>*CIICAp, Universidad Autonoma del Estado de Morelos  
Av. Universidad 1001 Chamilpa, 62210 Cuernava, Mor. México.*

Recibido el 7 de junio de 2001; aceptado el 22 de octubre de 2002

En este trabajo se describen los principios para la construcción de un sistema de comunicación pulsada vía fibra óptica. Además, se muestra experimentalmente cómo la propagación de una señal pulsada a través del sistema sufre atenuaciones y ensanchamiento, al propagarse en condiciones extremas de trabajo, tales como temperatura, curvaturas y torsión. En este trabajo también se describe el sistema que se implementó para generar, propagar y recibir los pulsos. Para la generación de pulsos se utiliza un circuito COMBO y para la codificación de la señal se utiliza un pulso de reloj de 4.096 MHz y otro de 8 KHz. Los resultados que se obtienen nos muestran que los pulsos codificados por este circuito son confiables y que es factible la utilización de este esquema sencillo. Para la transmisión de la señal se utiliza una fibra de 10 m multimodal y de índice gradual.

**Descriptores:** Fibras ópticas; comunicaciones ópticas.

In this paper we describe the basic principles of an optical fiber communication system and we show experimental propagation of a pulsed signal. We invest the broadening and attenuation of this pulses under adverse conditions of temperature, belts and twist. We also describe details of the mechanism of generation, propagation and reception of this pulses. For pulse generation it was used a COMBO circuit and two clocks (4.096 MHz and 8 KHz.). For transmission of this pulses it was used a 10 m multimodal optical fiber. Results of experimental analysis shows that pulse codification by this set up is safety and easy to build.

**Keywords:** Fiber optics; optics communications.

PACS: 84.30.Sk; 85.60.-q; 42.79.Sz; 42.81.-i.

### 1. Introducción

Muchos de los principios básicos de los sistemas de comunicación pueden utilizarse para desarrollar otras áreas de las ciencias y la ingeniería, tales como los sensores. En un sistema de comunicación las señales deben ser transportadas entre un transmisor y un receptor sobre alguna forma de medio de transmisión. El medio de transmisión puede ser: a) el espacio libre, b) alambre o cable metálico, c) fibra óptica. Sin embargo, las señales de información pocas veces encuentran una forma adecuada para la transmisión. Los sistemas de comunicación utilizan técnicas de modulación dependiendo del medio de transmisión.

Los sistemas de comunicaciones que utilizan como medio de transmisión la fibra óptica, emplean un medio físico dieléctrico como canal de transmisión. En este tipo de sistemas la información viaja en forma de haces de luz. Hay que tener en cuenta que la óptica geométrica, resalta que si el diámetro del núcleo de la fibra es mayor con respecto a la longitud de onda de la fuente que se desea utilizar, la luz viajará en forma de rayos de luz, o en ondas electromagnéticas guiadas si la longitud de onda es comparable con las dimensiones de la fibra; ya que aquí las leyes de la óptica geométrica resultan menos válidas, es necesario utilizar la teoría ondulatoria de la luz[1]. Como en los sistemas de radiocomunicación estos sistemas requieren de transductores para el acondicionamiento de la señal a transmitirse y reci-

birse. En el transmisor se requiere de un transductor de ondas de voltaje y corriente en ondas luminosas, en el receptor se requiere de un transductor de ondas luminosas en ondas de voltaje y corriente. Algunas de las principales ventajas de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica con respecto a los sistemas de radiocomunicación y a los sistemas por cables eléctricos son: eliminación de las interferencias electromagnéticas, aislamiento eléctrico, pérdidas pequeñas, ancho de banda grande, diámetro y peso pequeño, estabilidad en medios severos, etc. Algunas desventajas son: el costo es mayor en un sistema de comunicación por fibra óptica (desventaja que conforme el pasar de los años tiende a desaparecer) y la construcción de técnicas de transmisión y recepción más complejas.

La atenuación de una señal de luz que se propaga a lo largo de una fibra óptica es una consideración importante en el diseño de un sistema de comunicación óptica, ya que juega un papel importante en la distancia máxima de transmisión. La atenuación y ensanchamiento de un pulso que viaja a través de una fibra óptica se considera un aspecto importante que se debe tener en cuenta, ya que en algún momento dado si no se controlan o se toman en cuenta habrá pérdidas en la información [2].

Los principales objetivos de este trabajo son la realización y el entendimiento de un sistema de comunicación vía fibra óptica, la comprensión de las diferentes etapas que se necesitan para enviar señales a través de éstas y analizar pérdi-

das que sufre mediante el envío de una señal pulsada (pérdidas en lo que se refiere a atenuación por torsión, temperatura, presión, etc.). Todo esto se desea utilizar en un futuro para múltiples aplicaciones en comunicaciones y sensores. El tipo de modulación que se utiliza en este trabajo para codificar información de voz es la modulación por pulsos codificados (PCM).

## 2. Descripción del sistema de comunicación

El diseño de este sistema de comunicación consiste en el envío de pulsos a través de una fibra óptica, tratando de minimizar el uso de componentes electrónicos, ya que esto crea cierta inestabilidad en los sistemas de comunicaciones [3]. La codificación de la señal se encuentra en un intervalo entre 300 Hz a 3.4 KHz, los pulsos codificados por PCM son superiores a los sistemas codificados por modulación en amplitud de pulso (PAM) y modulación por ancho de pulso (PWM), ya que éstos no se consideran muy buenas modulaciones para transmitir a grandes distancias. Para lograr una señal PCM se requiere de la construcción de un filtro pasabandas que deje pasar el intervalo de frecuencias mencionado. El sistema cuenta con un emisor de tipo OPF372D (LED), con características de potencia de  $8 \mu\text{W}$  máximo y 850 nm de longitud de onda, un receptor de tipo OPF472D con un tiempo de respuesta de 6 ns a la misma longitud de onda que el LED. Para la codificación de la señal se utiliza un reloj de 4.096 Mhz, otro de 8 KHz y un circuito COMBO [4]. El circuito COMBO, es un elemento que se utiliza en las comunicaciones, ya que nos evita muchas etapas electrónicas posibles. Por ejemplo, este circuito nos convierte una señal de voz en modulación por pulsos codificados (PCM), enviando una señal en serie a 4.096 Mbits/seg. Al emplear este circuito podemos multiplexar hasta 60 canales de transmisión. Los resultados preliminares mostraron que los pulsos codificados por este circuito son confiables y que es factible la utilización de este esquema sencillo. Para nuestro caso, el ancho de pulso que se envió como una señal PCM es de 240 ns.

### 2.1. Codificación de Pulsos (circuito COMBO)

Un chip o circuito COMBO (MC145480) es usado para la digitalización y reconstrucción de la voz humana. Para digitalizar una señal como la voz, por ejemplo, se requiere que la relación señal a ruido este dentro de un intervalo de 25 dB y 30 dB. Este dispositivo tiene una entrada en un amplificador operacional cuya salida es la entrada a la sección de codificación. De esta sección inmediatamente la señal analógica va a un filtro pasabajas con un filtro activo RC para eliminar ruido de muy alta frecuencia. Del filtro activo RC, la señal analógica es convertida a una señal diferencial. Desde este punto, todo el proceso de la señal analógica es hecho diferencialmente. La ventaja en este diseño diferencial es que el ruido introducido por las fuentes de alimentación, que es una señal común, es cancelada cuando las señales invertidas y no invertidas son reconocidas.

Este circuito también tiene la opción de utilizar dos tipos de compansión como es la ley  $\mu$  y la ley A. En el diseño se utilizó la ley  $\mu$ , debido a que la compansión de ley A es inferior a la ley  $\mu$  en términos de calidad de señal pequeña. La compansión de una señal no es más que el proceso de comprimir y luego expandir una señal. El circuito COMBO opera a una velocidad de dato de transmisión y recepción de 4.096 Mbps. Los pulsos de sincronización para tramas de transmisión y recepción son entradas de 8 KHz que establecen las velocidades de señales de transmisión y recepción, así también, distinguen la trama para la transmisión de señales y la trama sin transmisión de señal. Este circuito tiene la capacidad de aceptar como reloj desde 256 KHz, 512 KHz, 2.048 MHz y 4.096 MHz, este último es el que se está utilizando para nuestro caso, además este circuito se alimenta con 5 Volts, la cual nos permite baja disipación de potencia típica de 0.01 mW y como máximo 0.5 mW. Este circuito utiliza el código unipolar NRZ. En la Fig. 1 se muestra un diagrama indicando la posición del circuito COMBO [4].

### 2.2. Etapa de transmisión

La etapa de transmisión se encarga de transmitir los pulsos que se van a acoplar a la fibra óptica [5]. Para que estos pulsos sean mandados a través de la fibra óptica, se necesita un circuito de excitación para el transmisor óptico. La fuente de luz que se utilice en los sistemas de comunicaciones debe de ser compatible con la fibra óptica: pequeñas, fáciles de modular a las velocidades utilizadas en los sistemas de comunicación y confiables. Los circuitos de excitación para las fuentes de luz tienen como función, convertir el voltaje de la señal a transmitir en una corriente modulada con un valor pico adecuado a las características normales de operación de la fuente óptica que se use. Para el circuito de excitación se utilizó un transistor, debido a que los pulsos que se enviaron son códigos que están comprendidos de 0 y 1 lógicos. El transistor que se escogió es el 2N914 que es uno de los transistores que satisfacía nuestras necesidades tanto en la respuesta rápida de encendido y apagado, como una corriente de colector requerida para poder alimentar el LED que se utilizó. El LED utilizado es el OPF372D, con  $8 \mu\text{W}$  de potencia, un tiempo de respuesta de 5.5 ns, una longitud de onda central de 850 nm y un ancho espectral de 50 nm, con un voltaje de polarización directa de  $2 V_{\text{máx}}$  y una corriente máxima de operación de 100 mA.

### 2.3. Fibra óptica

La fibra óptica forma parte muy importante de la transmisión, pues a través de ella viajan los pulsos de nuestro sistema de comunicación. En nuestro caso se utilizó una fibra multimodo con un diámetro del núcleo de  $62.5 \mu\text{m}$  y  $125 \mu\text{m}$  de diámetro en el revestimiento. La operación específica en longitud de onda de la fibra está en un intervalo de 850 nm a 1300nm. Tiene una atenuación de  $2.8 \pm 0.6 \text{ dB/Km}$  a una longitud de

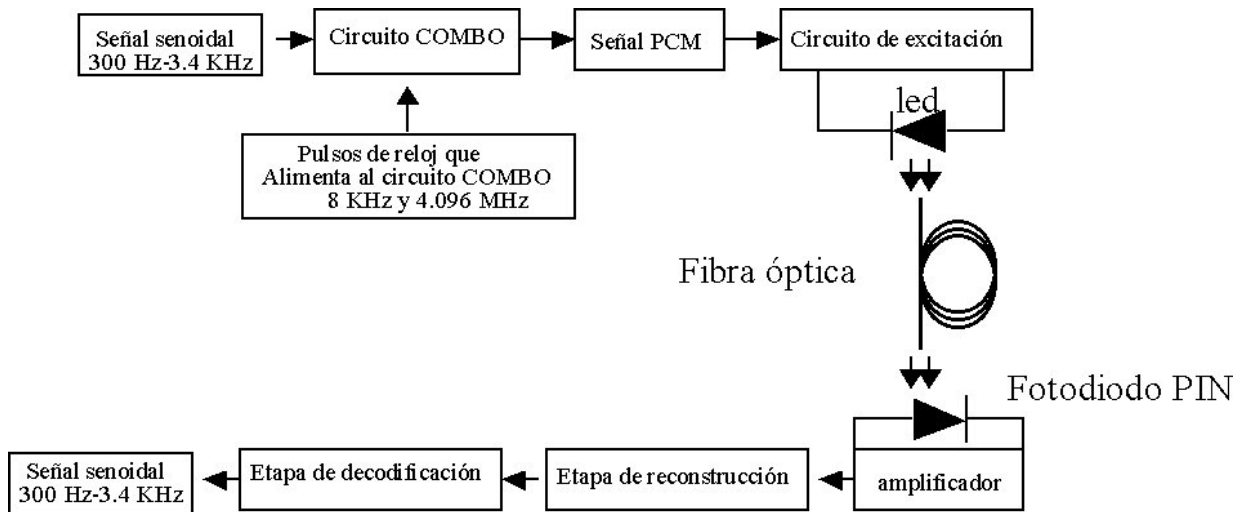


FIGURA 1. Diagrama de bloques del sistema de comunicación.

onda de 850 nm. A esta longitud de onda presenta un índice de refracción de 1.5014. La apertura numérica de la fibra es de  $0.275 \pm 0.015$ .

#### 2.4. Etapa de recepción

En esta etapa se debe tener en cuenta la potencia óptica que va a estar llegando al fotodiodo, así como la velocidad con la que se recibe la información. A partir de aquí se diseña el equipo receptor, por lo que se procedió a medir la potencia óptica que llega al final de la fibra óptica, la cual es de  $7 \mu\text{W}$ ; por lo tanto, eso es lo que va a recibir el fotodiodo. Éste genera una corriente de  $1 \mu\text{A}$ , por lo que a partir de aquí se diseñó el amplificador de realimentación proporcional a la tensión. El fotodiodo utilizado presenta una responsividad de  $0.55 \text{ A/W}$ , corriente de oscuridad de  $0.10 \text{ nA}$ , longitud de onda de respuesta de  $850 \text{ nm}$ , tiempo de respuesta de  $6 \text{ ns}$  y una capacitancia total de  $3 \text{ pf}$ . El circuito llamado realimentación proporcional a la tensión de salida en el amplificador inversor (amplificador de transimpedancia), el cual se comporta como un convertidor de corriente a tensión, la cual tiene una impedancia de entrada cero, impedancia de salida cero y transimpedancia constante. Este tipo de amplificador mostró mayor estabilidad que un amplificador inversor común. La señal que se recibe no es totalmente cuadrada, como la señal que se estaba mandando, por lo que se recurrió a un inversor con disparo tipo Schmitt. Normalmente los diseñadores de circuitos lógicos emplean circuitos integrados (CI) con entradas tipo Schmitt para convertir señales lentas en señales rápidas y libres de oscilaciones que puedan controlar las entradas en CI estándar. El CI que nosotros utilizamos fue el 74HC14. Los resultados que nos muestran todo el funcionamiento en conjunto, con todos los elementos implementados en nuestro sistema para la transmisión de una señal por fibra óptica, se describen posteriormente.

### 3. Resultados Experimentales

A continuación se muestran las señales electrónicas de todo nuestro sistema electrónico empezando por la Fig. 2a, que muestra un ejemplo de la modulación de los pulsos codificados que el circuito COMBO genera, mostrando un código 10101110, donde la duración de cada *bit* es de  $240 \text{ ns}$ , y el código completo es de  $1.92 \mu\text{s}$ . El código que se genera es de 8 *bits*. Posteriormente se muestra (en el canal 1, Fig. 2b) una señal recibida por el receptor, la cual no se encuentra reconstruida todavía y, además, tiene un retardo en dicha señal comparada con los pulsos enviados a través de la fibra óptica. Este retardo es provocado por la transición en cada uno de los componentes electrónicos que atraviesa la señal. En el canal 2 de esta figura se muestra el pulso (sin reconstruir aún) que se envió a través de la fibra óptica con un código de 10101010. En la Fig. 2c se encuentra el pulso reconstruido en el canal 1 (ya que los pulsos que se muestran en el canal 1 de la Fig. 2b no están reconstruidos) listo para poder ser decodificado. En el canal 2 de la Fig. 2c, se muestra el pulso enviado a través de la fibra óptica, aquí vemos la señal que se envió en forma invertida, pero esto no es crítico para llevar a cabo la transmisión y recuperar dicha señal. En la Fig. 2d se tiene la señal senoidal que se está codificando en una señal PCM, para después ser transmitida a través de la fibra óptica. Vemos que la señal tiene una amplitud pico a pico de  $400 \text{ mV}$  a una frecuencia de  $3.125 \text{ KHz}$  (canal 2). En el canal 1 observamos la señal senoidal que se recibe en el receptor, después de haber atravesado la fibra óptica como señal PCM, además, siendo decodificada. Como se ve la señal tiene la misma frecuencia que la señal enviada a través de la fibra y una amplitud de  $500 \text{ mV}$ . Vemos también que la señal está retrasada respecto a la señal que se está enviando. Es importante resaltar que las figuras mostradas presentan señales distintas de codificación, esto debido a que en la práctica y con recursos limitados de

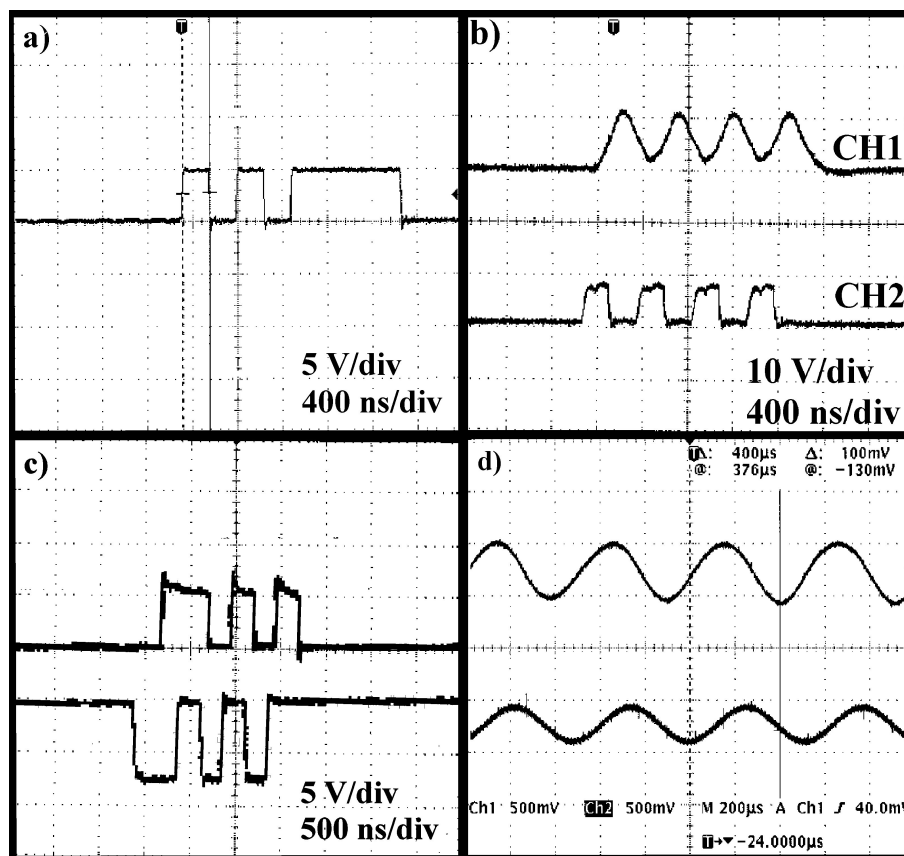


FIGURA 2. Ejemplo de: a) pulsos codificados, b) pulso enviado y recibido en el receptor sin reconstruir, c) pulso reconstruido listo para poder decodificar la seña, d) seña senoidal que se codificó y decodificó.

laboratorio es un poco difícil encontrar un mismo código y monitorear la seña desde su entrada hasta la salida.

Después del análisis de las señaes electrónicas se procedió a analizar las pérdidas en el sistema. El primer paso para analizar nuestro sistema consistió en observar el comportamiento de la amplitud y el ensanchamiento del pulso a diferentes temperaturas, desde 20 °C hasta 90 °C (con una incertidumbre en las mediciones de  $\pm 0.5$  °C). En la Fig. 3a, se observa que la amplitud es independiente de la temperatura, ya que se mantiene constante. Pero en cambio se observa un ensanchamiento del pulso recibido, ya que a temperatura ambiente el pulso que se recibe es de  $260 \pm 5$  ns, hasta los 47 °C el pulso se mantiene constante. A partir de aquí, el pulso se empieza a ensanchar ligeramente hasta llegar a un máximo de  $270 \pm 5$  ns; esto debido a que la fibra sufre una dilatación debida al incremento de la temperatura, hasta llegar a un máximo y quedar constante, afectando en una disminución del índice de refracción del núcleo de la fibra óptica. Sin embargo, en este caso no se observa pérdida de información. El porcentaje de atenuación es del 0 % de la amplitud total, el porcentaje del ensanchamiento del pulso es del 3.70 %. La atenuación es de 0 dB/m.

Posteriormente, en la Fig. 3b se tiene la transmisión de pulsos a través de la fibra óptica, donde la fibra está sujeta a diferentes diámetros de circunferencia hasta llegar a un posible microdoble. En esta, figura tanto el ensanchamiento

del pulso como la amplitud del pulso se mantuvieron constantes hasta cuando la fibra estuvo enrollada con un diámetro de 3 cm (con una incertidumbre de  $\pm 0.5$  mm). Hubo pérdida de información hasta que la fibra estuvo con un doblez (a 0.2 cm). Esto debido a la atenuación en amplitud de voltaje y no por el ensanchamiento del pulso. La atenuación se debe a que la interfaz núcleo revestimiento deja de ser geométrica-mente uniforme, por lo tanto la luz se refleja en algunos puntos con ángulos diferentes de los que inicialmente se habían dispuesto, y esto debido a que la reflexión total interna no se satisface, y con ello se produce una fuga de modos hacia el revestimiento. El porcentaje de atenuación es del 87.36 %, el porcentaje del ensanchamiento del pulso es del 9.72 %. La atenuación es de -1.1 dB/m.

El análisis del comportamiento del pulso cuando la fibra óptica es doblada un cierto ángulo también es importante (Fig. 3c). Vemos cómo el ensanchamiento del pulso se mantiene constante hasta los 60 grados (incertidumbre de  $\pm 0.5$  grados). A partir de aquí hasta los 130 grados sufre un ensanchamiento de 8 ns, después la amplitud del pulso cae a partir de los 70 grados a los 90 grados de 9 a 7 V y a partir de los 120 grados empieza a caer más rápidamente. A partir de aquí los cambios que sufren tienden a ser lineales; estos cambios son producidos debido al cambio geométrico de la fibra óptica, produciendo que la reflexión interna ya no se cumpla y entonces, varios modos de propagación se escapan por el

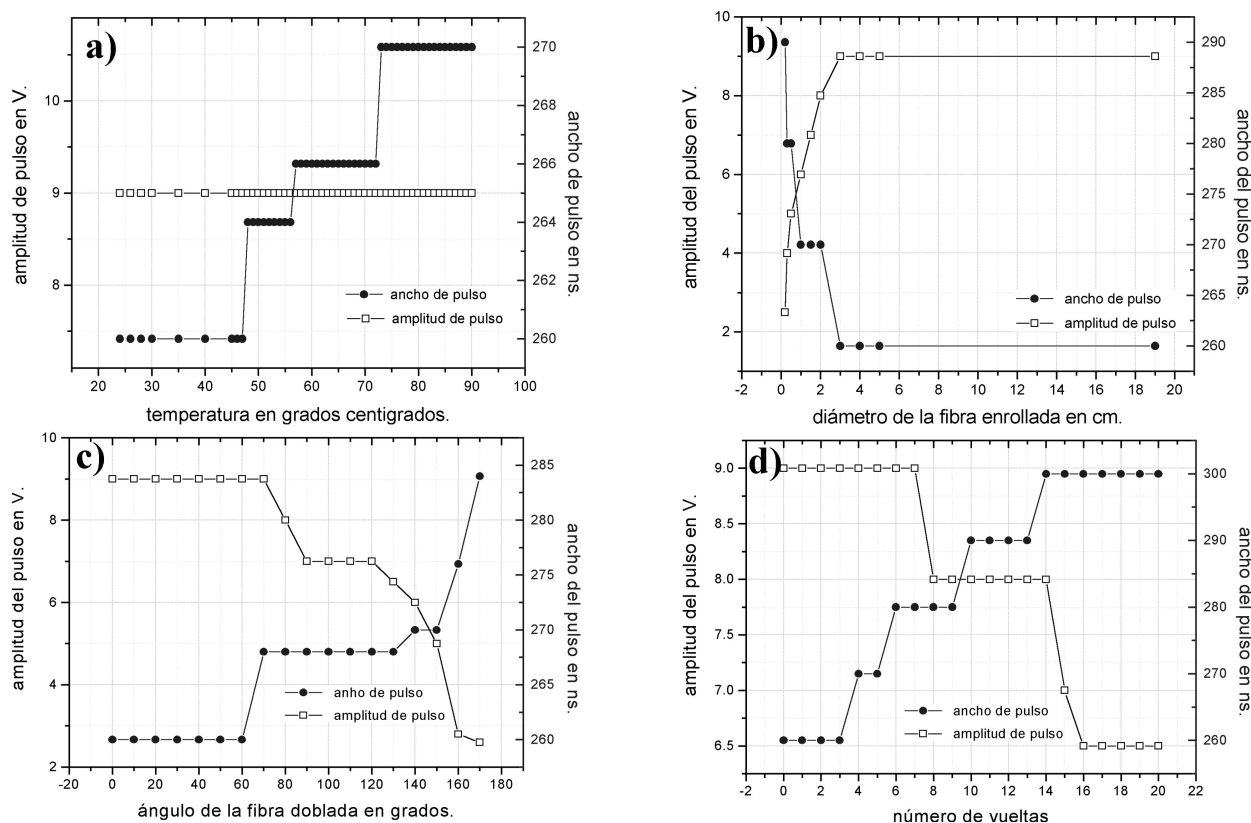


FIGURA 3. Resultados de la caracterización de la propagación de pulsos a través de un sistema de comunicación por fibra óptica: a) efectos de la temperatura, b) efectos de diferentes diámetros de la fibra enrollada, c) efectos por el doblamiento de la fibra, d) efectos por torsión en la fibra enrollada. La incertidumbre en las mediciones son de:  $\pm 0.5$  V para la amplitud de pulso y  $\pm 5$  ns para el ancho de pulso.

revestimiento. Hasta los 155 grados no hubo pérdida de información. El porcentaje de atenuación es del 68.88 %, el porcentaje del ensanchamiento del pulso es del 8.45 %. La atenuación es de  $-1.07$  dB/m.

Finalmente, se observó el comportamiento del pulso cuando a la fibra óptica se le aplica una torsión a través de una determinada torsión a lo largo de la fibra. Como se ven en la Fig. 3d, al torcer la fibra, en la vuelta número siete el voltaje decae a 8 V, manteniéndose constante hasta la vuelta número 14; la mínima amplitud que se llegó a tener fue de 6.5 Volts. El ensanchamiento del pulso aumenta en la vuelta número 3, llegando a un máximo de ensanchamiento de 300 ns. En este caso no hay pérdida de información. Esto sucede también debido a lo que se explicó tanto en las Figs. 3a y 3c. El porcentaje de atenuación es del 27.77 %, el porcentaje del 13.33 %. La atenuación es de  $-0.28$  dB/m.

En la Tabla I se muestran resumen de los análisis mencionados, observando las diferencias de cada uno de los comportamientos analizados.

#### 4. Conclusiones

En cuanto al sistema electrónico, éste tiene la capacidad de transmitir 60 canales de información utilizando un método de multiplexaje por división de tiempo. La relación señal a ruido que presenta este sistema es de 26.37 dB, lo cual es

un aspecto muy importante para la recuperación de nuestra señal en el receptor. Se tuvo una pérdida en el envío de una señal en potencia de  $0.04 \mu\text{W}$  por los diez metros utilizados en este experimento, lo cual nos es factible mandar la señal y poder recibirla a aproximadamente 1500 m de longitud con los  $7 \mu\text{W}$  de potencia que produce el láser. De acuerdo a esto el sistema presenta una buena recuperación de señal. A pesar de la longitud de onda utilizada, este esquema puede funcionar muy bien para ciertas aplicaciones. Sin embargo, esto se puede extender hacia longitudes de onda más convenientes, como por ejemplo 1550 nm, donde la atenuación de la radiación por propagación dentro de la fibra es mínima.

En el análisis de los efectos causados en la propagación de los pulsos podemos concluir que en todos los casos hubo un ensanchamiento del pulso recibido, y en la amplitud de voltaje también se produjo un decaimiento, en donde esta amplitud de voltaje es independiente de la temperatura. Con esto llegamos a la conclusión de que la pérdida de información en nuestro sistema no depende del ensanchamiento del pulso sino de la atenuación en amplitud que presentaron los pulsos por parte de la señal. Con estos análisis se puede decir que la fibra óptica puede ser utilizada en muchas aplicaciones diferentes, desde la comunicación óptica hasta el uso como sensor, pero considerando lo antes mencionado. Como ejemplo del uso de este sistema podemos mencionar que se puede emplear la fibra óptica en un robot, aparte de ser un sistema

TABLA I. Resultados del análisis de los pulsos propagados.

Características que se observaron	Transmisión al aire libre	Fibra bajo diferentes condiciones				unidades
		temperatura	fibra Enrollada	Fibra doblada	torsión	
Porcentaje de atenuación del pulso	96	0.0	87.36	68.8	27.7	%
Atenuación del pulso	-2.79	0.0	-1.1	-1.07	-0.28	dB/m
Porcentaje del ensanchamiento del pulso	27.22	3.7	9.72	8.45	13.3	%

de comunicación, trayendo como beneficio la disminución del peso en éste, además de tener una señal de monitoreo muy buena. Esto es con base en las diferentes pruebas de atenuación hechas en el laboratorio, utilizando siempre y cuando

una señal no arriba de 4.096 MHz. En general, este sistema sencillo de transmisión puede ser de gran utilidad para implementarse sistemas de comunicaciones y sensores por fibra óptica.

1. J.L. Camas Anzueto, *Análisis de atenuación y ensanchamiento de una señal pulsada en fibra óptica*. Tesis de Maestría (Optica), INAOE, (agosto de 2000).
2. J.P. Nérrou, *Introducción a las Telecomunicaciones por Fibras Ópticas*, (Ed. Trillas, México 1991), p. 35.
3. G.P. Agrawal, *Fiber Optic Communication Systems*, (Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1992), p. 47.
4. W. Tomasi, *Sistema de Comunicaciones Electrónicas*, (Ed. PHH, México 1996), pp. 614 y 653.
5. B. Rubio Martínez, *Introducción a la Ingeniería de la Fibra Óptica*, (Ed. Addison-Wesley Iberoamericana, USA 1994), p. 233.