

## Diseño y construcción de un enlace optoelectrónico

### Resumen

Se diseña y construye un enlace optoelectrónico para guiar una señal luminosa, la cual ha sido modulada por una señal multicanalizada, de video en banda base y una señal de RF modulada en frecuencia.

Las señales de información están multicanalizadas por división de frecuencia. La señal electrónica multicanalizada modula a la potencia luminosa de un diodo láser y se inyecta en la fibra óptica por un extremo, y se recupera por el extremo opuesto. La señal luminosa recuperada se transforma en una señal electrónica.

Las partes fundamentales del enlace optoelectrónico se muestran en la Fig. 1.

### 1 Fibra óptica

Para la transmisión de la señal luminosa, se emplea un canal de fibra óptica. La fibra usada es del tipo monomodo estándar con 500 m de longitud. La fibra presenta un núcleo de 10  $\mu\text{m}$  y diámetro de 125  $\mu\text{m}$ , operando a una longitud de onda óptica de 1.3  $\mu\text{m}$ . La atenuación en la fibra es de 0.4 dB/Km.

### 2 Fototransmisor

El circuito fototransmisor está construido a partir de un diodo láser (DL) y un transistor polarizado en la región lineal. El DL se coloca en el colector del transistor, por tanto, al circular una corriente constante por el DL

emite una potencia luminosa constante. Si se inyecta al transistor la señal multicanalizada, entonces, hace variar la corriente de colector. La potencia luminosa emitida por el DL será proporcional a la señal multicanalizada.

Se caracteriza el DL para determinar el valor adecuado de la corriente de colector y del punto de operación del DL.

### Caracterización del diodo láser

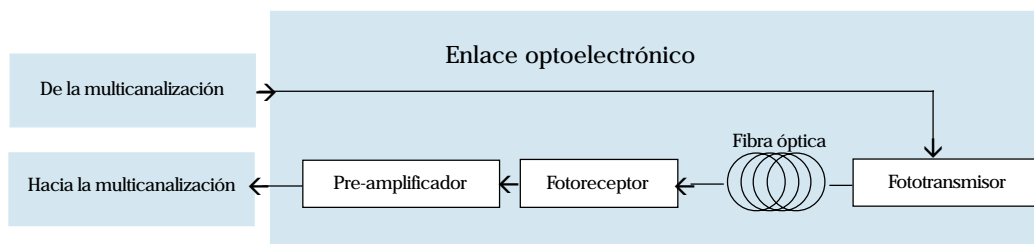
El diodo utilizado es el modelo FLD3C5LK de la compañía FUJITSU. Los parámetros proporcionados por el fabricante se muestran en la tabla 1.

$I_f = 150 \text{ mA}$	Corriente máxima del diodo
$P_o = 7 \text{ mW}$	Potencia máxima del diodo
$\Delta\lambda = 80 \text{ nm}$	Ancho espectral de la luz
$t_r = 3 \text{ ns}$	Tiempo de respuesta
$\lambda = 1.3 \mu\text{m}$	Longitud de onda de emisión

TABLA 1 PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL DL

Para determinar el punto de operación del DL, se hizo circular corriente al dispositivo de 4 hasta 150 mA, como se muestra en la Fig. 2.

FIG. 4.1 ENLACE OPTOELECTRÓNICO



# Notas

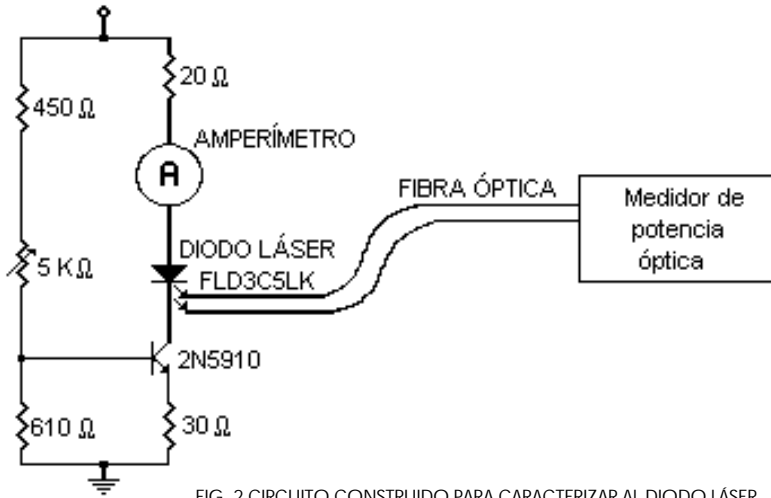


FIG. 2 CIRCUITO CONSTRUIDO PARA CARACTERIZAR AL DIODO LÁSER

Los resultados se muestran en la Fig. 3. Se obtuvo la siguiente respuesta de potencia luminosa emitida por corriente inyectada.

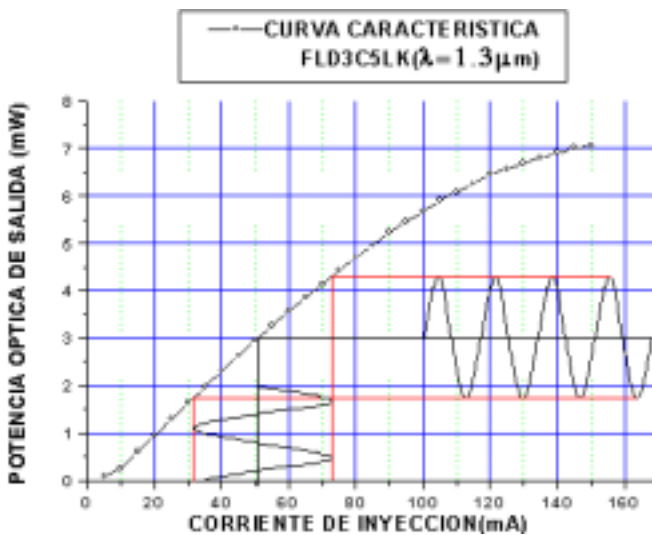


FIG. 3 CARACTERIZACIÓN DEL DL INFRARROJO PARA OBTENER SU PUNTO DE OPERACIÓN

Se propone que la corriente que circule por el láser sea de 46 mA para que exista una excursión lineal, de

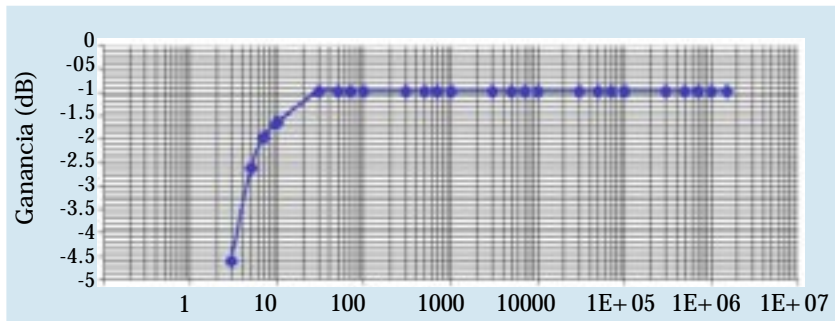


FIG. 5 RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL TRANSISTOR POLARIZADO

la corriente de la señal a transmitir. En condiciones de modulación óptica y de acuerdo con la caracterización del diodo láser, el índice de modulación es del orden de  $m=0.40$ .

$$m = \frac{P_{MAX} - P_{min}}{P_{MAX} + P_{min}} \approx \frac{4.2 - 1.8}{4.2 + 1.8} \approx 0.40 \quad (1)$$

## Polarización del transistor

El circuito que polariza a la fuente óptica, para una óptima operación, está basada en un transistor, tal como se muestra en la Fig. 4.

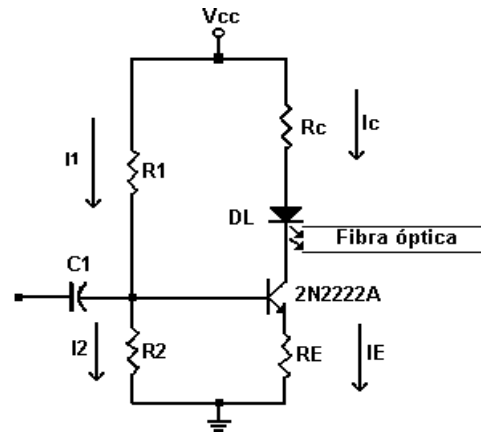


FIG. 4 CIRCUITO POLARIZADOR DEL DL

Se diseña y construye el circuito, se ajustan los resultados a valores comerciales.

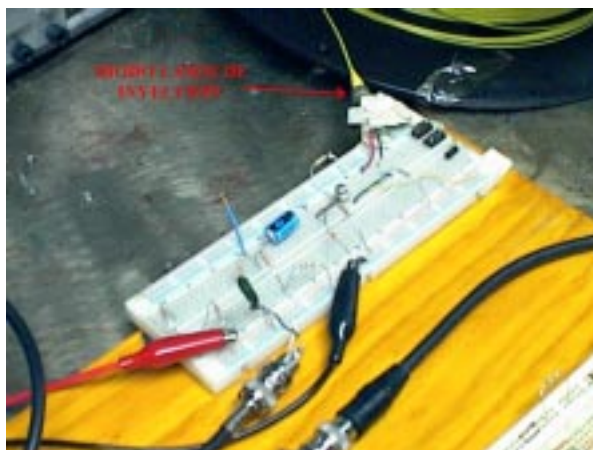
- $R_C = 6.8 \text{ W}$
- $R_E = 33 \text{ W}$
- $R_1 = 15 \text{ KW}$
- $R_2 = 10 \text{ KW}$
- $V_{cc} = 12 \text{ V}$
- $I_c = 46 \text{ mA}$

La respuesta en frecuencia del circuito polarizado se observa en la Fig. 5.

La respuesta a la frecuencia es plana, lo cual garantiza la no-distorsión de la señal multicanalizada. En el diseño se propone una resistencia  $R_E = R_C + r_d$ , esto es para lograr una ganancia casi unitaria. Se emplea un transistor para polarizar al DL, y así tener

una respuesta casi lineal para toda señal de entrada. La ganancia calculada es la relación entre la señal amplificada en el colector y la señal de entrada en la base del transistor.

En la fotografía 1 se muestra el fototransmisor acoplado con la fibra óptica.



FOTOGRAFÍA 1 FOTOTRANSMISOR

### 3 Fotorreceptor

En esta sección se describe al fotorreceptor y se analizan sus fuentes de ruido. Se realiza el cálculo de la relación señal a ruido del enlace optoelectrónico.

El fotodiodo de la Fig. 6 está en una configuración de alta impedancia. El fotodetector utilizado es tipo PIN, de la compañía FUJITSU, cuyas características se muestran en la tabla 2.

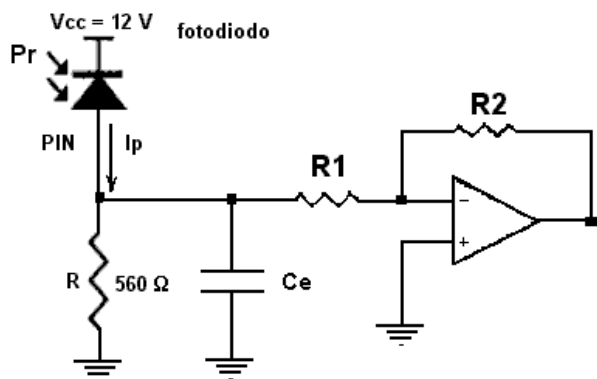


FIG. 6 CONVERSIÓN ÓPTICO-ELECTRÓNICO

PIN de InGaAs	Fotodetector
$R = 0.75 \text{ A/W}$ @ 1300 nm	Responsividad del fotorreceptor
BW = 10 MHz	Ancho de banda del fotorreceptor
$\lambda = 1.3 \mu\text{m}$	Longitud de onda
$C_e = 40 \text{ pF}$	Capacitancia equivalente
$R_e = 382 \Omega$	Resistencia equivalente
$I_o = 10 \text{ nA}$ @ T=25°C	Corriente en oscuridad

TABLA 2 PARÁMETROS DEL DIODO Y EL AMPLIFICADOR

En el circuito de la Fig. 7 se pueden observar el circuito equivalente del diodo PIN, R, R1 y Ce de la Fig. 6 para la corriente alterna.

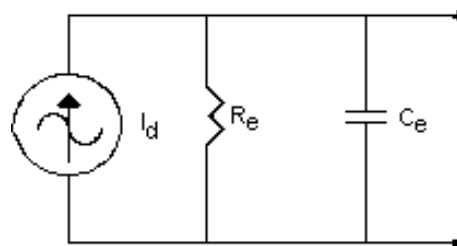


FIG. 7 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL DIODO PIN, R, R1 Y CE DEL CIRCUITO DE LA FIG. 6

donde

$I_d = I_p$  = Corriente del fotodiodo.

$R_e$  = Resistencia equivalente.

$C_e$  = Capacitancia equivalente.

La frecuencia del polo dominante formado por el resistor  $R_e$  y el capacitor  $C_e$  del circuito equivalente del fotorreceptor, determinan el ancho de banda.

$$\frac{1}{2\pi R_e C_e} \geq B \quad (2)$$

$$B = 10.4 \text{ MHz} \quad (3)$$

donde B es el ancho de banda.

Puesto que se requiere recuperar la señal en banda base, un ancho de banda limitado a 10 MHz en la foto-detección resulta suficiente.

El circuito completo para recuperar la señal multicanalizada se muestra en la Fig. 8.

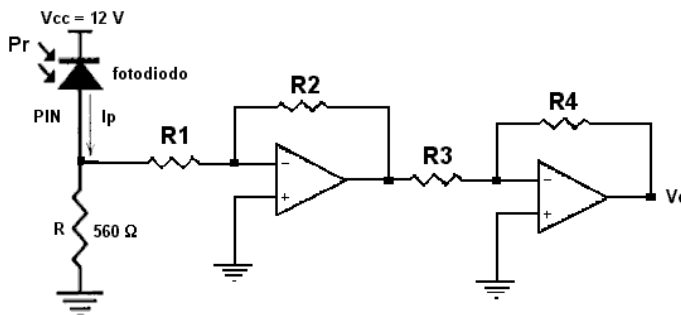
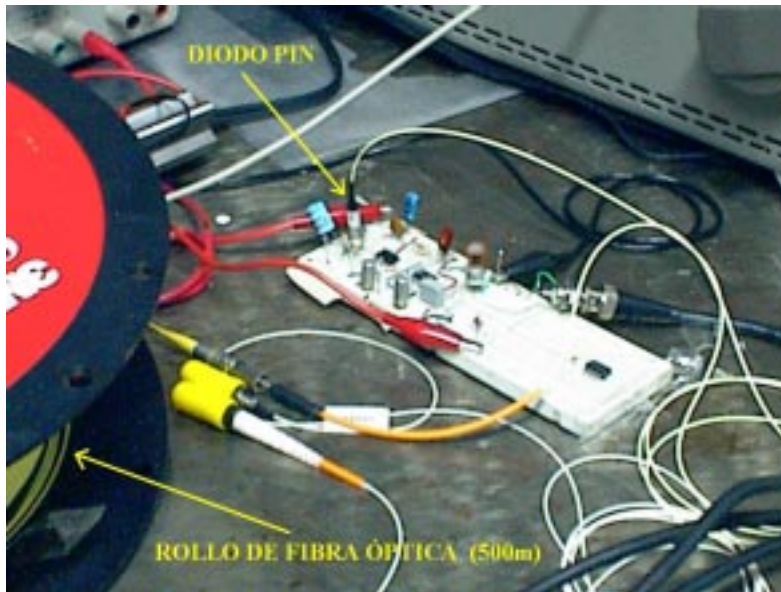


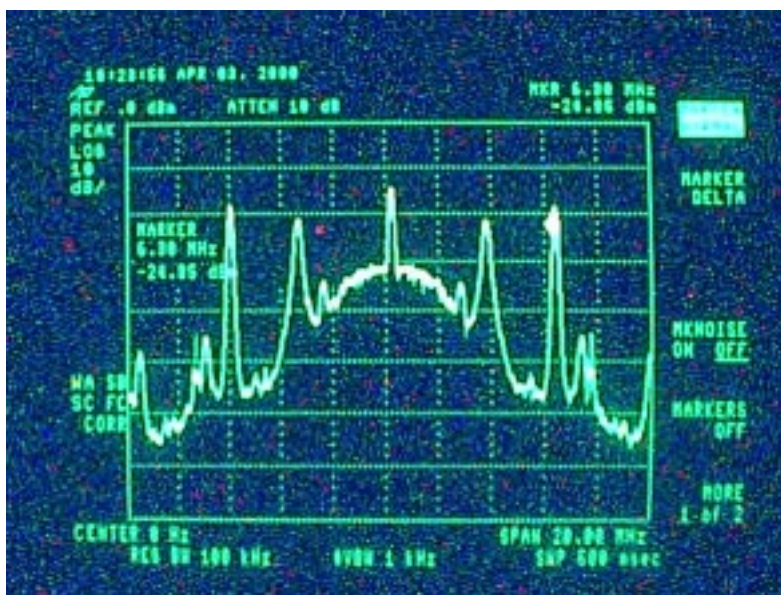
FIG. 8 CIRCUITO PARA RECUPERAR LA SEÑAL LUMINOSA

En la fotografía 2 se muestra el circuito transductor óptico-electrónico acoplado a la fibra óptica. Se puede observar un cable coaxial, éste va directamente al receptor de audio y video.



FOTOGRAFIA 2 CIRCUITO TRANSDUCTOR ÓPTICO-ELECTRÓNICO (FOTORECEPTOR)

En la fotografía 3 se observa el espectro de la señal recuperada, la señal de video en banda base y la portadora de audio.



FOTOGRAFÍA 3 SEÑAL MULTICANALIZADA, RECUPERADA POR EL FOTORECEPTOR

#### 4 Fuentes de ruido en un fotodetector

El circuito transductor de la Fig. 9 es una configuración de alta impedancia.

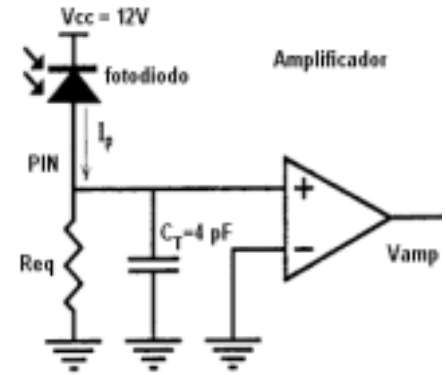


FIG. 2.9 CONVERSIÓN ÓPTICO-ELECTRÓNICO

En el circuito de la Fig. 10 se pueden observar los dispositivos que generan a  $R_{eq}$  y a  $C_T$ .

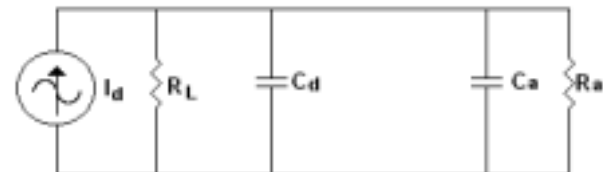


FIG. 10 CIRCUITO EQUIVALENTE SIMPLIFICADO DEL CIRCUITO TRANSDUCTOR ÓPTICO-ELECTRÓNICO

donde

$$I_d = I_p = \text{Corriente del fotodiodo.}$$

$$R_L = \text{Resistencia de carga.}$$

$$C_d = \text{Capacitancia del diodo.}$$

$$C_a = \text{Capacitancia de entrada del amplificador.}$$

$$R_a = \text{Resistencia de entrada del amplificador.}$$

Por tanto:

$$R_{eq} = R_L \parallel R_a$$

$$C_T = C_d + C_a$$

La frecuencia del polo dominante formado por el resistor  $R_{eq}$  y el capacitor  $C_T$  (4 pF), del circuito equivalente del fotoreceptor, determinan el ancho de banda. Ésta dada por [1]:

$$\frac{1}{2\pi R_{eq} C_T} \geq B \tag{4}$$

donde B es el ancho de banda.

El amplificador utilizado es un amplificador en circuito integrado, configurado para obtener una ganancia fija y un ancho de banda B. Para calcular el valor de  $R_{eq}$  en el amplificador de alta impedancia se usa la Ec. (5).

$$R_{eq} \leq \frac{1}{2\pi B C_T} \tag{5}$$

pero como  $R_{eq}$  es el paralelo de  $R_L$  y  $R_a$ , entonces:

$$R_L \leq \frac{R_{eq} R_a}{R_a - R_{eq}}$$

El ruido de disparo  $\langle i_p^2 \rangle$  no depende de la frecuencia sino únicamente del ancho de banda y tiene un valor de:

$$\langle i_p^2 \rangle = 2e I_p B \tag{6}$$

Existe también ruido debido a la corriente en oscuridad  $I_o$ . Los electrones que dan lugar a esta corriente saltan la barrera de potencial en forma aleatoria. El resultado es el ruido de metal de grano menudo, y en un fotodiodo PIN es igual a [2]:

$$\langle i_o^2 \rangle = 2e I_o B \tag{7}$$

donde  $e$  es la carga del electrón.

Este ruido es blanco [3] dentro de la banda de respuesta del detector.

Como se puede observar en la Fig. (10) el circuito tiene un resistor equivalente, el cual produce ruido térmico. Éste no depende de la frecuencia (excepto en frecuencias extremadamente altas) pero si es dependiente del ancho de banda. Tal como se puede observar en la ecuación (6) [4]:

$$\langle i_t^2 \rangle = \frac{4kTB}{R_{eq}} \tag{8}$$

donde

$k$  = es la constante de Boltzmann

$T$  = es la temperatura absoluta

Los ruidos de disparo, de oscuridad y térmico son no-correlacionados, por tanto, la única manera de obtener el ruido total del circuito es sumando del valor cuadrático medio de cada uno de ellos. Entonces el ruido total del circuito es [5]:

$$\langle i_{\Sigma}^2 \rangle = 2e(I_p + I_o)B + \frac{4kTB}{R_{eq}} \tag{9}$$

Es importante mencionar que el sistema receptor capta una señal analógica y no digital, por tanto, para un fotodetector PIN el valor promedio del cuadrado de la corriente, en presencia de modulación es [6]

$$\langle I_p^2 \rangle = \frac{m^2 R_o^2 P_r^2}{2} \tag{10}$$

donde

$m$  = índice de modulación, se define en la ecuación (1).

$R_o$  = responsividad del fotodetector.

$P_r$  = Potencia luminosa recibida.

$$m = \frac{P_{MAX} - P_{min}}{P_{MAX} + P_{min}} \tag{11}$$

donde

$P_M$  = Potencia máxima recibida

$P_m$  = Potencia mínima recibida

Entonces la relación señal a ruido (S/N) del circuito transductor óptico-electrónico es [7]

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left( \frac{m^2 R_o^2 P_r^2}{2e(I_p + I_o)B + \frac{4kTB}{R_{eq}}} \right) \tag{12}$$

Para calcular la longitud del enlace se aplica la siguiente ecuación

$$L[\text{Km}] = \frac{A[\text{dB}]}{\alpha \left[ \frac{\text{dB}}{\text{Km}} \right]} \tag{13}$$

donde

$L$  = es la longitud del enlace óptico

$A$  = son las pérdidas admisibles.

$\alpha$  = factor de atenuación de la fibra óptica.

La pérdida admisible ( $A$ ), se define como

$$A[\text{dB}] \leq P[\text{dBm}] - (D_T[\text{dB}] + P_r[\text{dBm}] + M[\text{dB}]) \tag{14}$$

donde

$P$  = Potencia luminosa transmitida.

$D_T$  = Pérdidas totales por acoplamiento.

$P_r$  = Potencia luminosa detectada.

$M$  = Margen de seguridad.

## 5 Cálculo teórico de la relación señal a ruido del enlace optoelectrónico

El sistema de transmisión se integró de acuerdo a la Fig. 11.

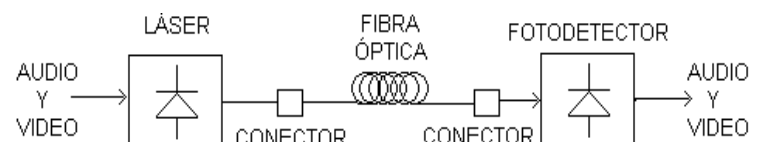


FIG. 11 SISTEMA DE TRANSMISIÓN ELECTRO-ÓPTICO



De acuerdo con las condiciones de diseño, el diodo láser proporciona una potencia luminosa de 3 mW. Esta potencia se acopla al canal de fibra óptica de 500m de longitud mediante un conector óptico. A la salida del canal óptico, la señal luminosa transmitida se acopla al fotodetector mediante un segundo conector óptico. Los conectores ópticos introducen pérdidas ópticas del orden de 3 dB. De este modo, de acuerdo con el sistema de la Fig. 11, el balance de potencia en el enlace óptico, determina que la potencia recibida por el fotodetector es del orden de 0.75mW.

De acuerdo con el balance de potencia del enlace, la potencia óptica promedio ( $P_{ro}$ ) recibida por el fotodetector es del orden de 0.75 mW.

Con señal de modulación y de acuerdo con la Fig. 3, el índice de modulación en la ecuación (15)

$$m = \frac{P_{MAX} - P_{min}}{P_{MAX} + P_{min}} \approx \frac{4.2 - 1.8}{4.2 + 1.8} = 0.4 \quad (15)$$

y la potencia fotodetectada, con modulación sinusoidal es

$$P_r = P_{ro}(1 + m \cos \omega t) \quad (16)$$

De acuerdo con las ecuaciones (10) y (11), la relación señal a ruido del circuito fotodetector, considerando únicamente las contribuciones de ruido térmico y ruido en oscuridad, está dado por

$$\left. \frac{S}{N} \right|_{dB} = 10 \log \left( \frac{m^2 R_o^2 P_r^2}{2e I_p B + \frac{4kTB}{R_{eq}}} \right) \quad (17)$$

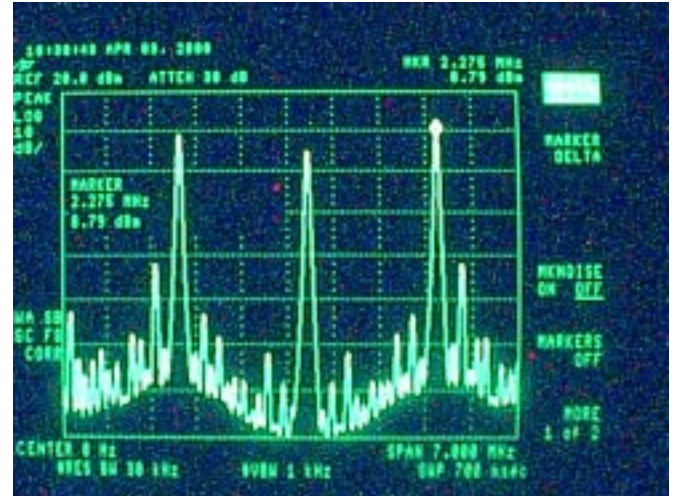
entonces, la relación señal a ruido teórica, a la salida del circuito fotodetector amplificador, considerando únicamente la influencia de los ruidos térmicos y de disparo, y en base a los datos de la tabla 2 es de

$$S/N = 71 \text{ dB}$$

Este valor de S/N, relativamente alto, no incluye la contribución de ruido en el proceso de modulación óptica, el ruido en la transmisión ni el ruido de otras fuentes y sólo deberá tomarse como un valor de referencia, como un caso bastante idealizado. Un análisis exhaustivo del ruido sale de las perspectivas de éste trabajo.

## 6 Cálculo práctico de la relación señal a ruido del enlace optoelectrónico

En la fotografía 4 se muestra un acercamiento a la pantalla de un analizador de espectros para mostrar la medición de la relación señal a ruido. Esto se hace aplicando una señal sinusoidal de prueba de 2 MHz y 1 Vpp, y se compara con el ruido.



FOTOGRAFÍA 4 MEDICIÓN DE LA RELACIÓN SEÑAL A RUIDO

De la fotografía 42 se determina una relación señal a ruido del orden de 50 dB. Con este valor se realizan los cálculos para obtener la longitud teórica máxima de transmisión, de la señal luminosa; a partir del siguiente proceso:

- En la Ec. (17) se suma un valor de ajuste de ruido de  $2.5 \times 10^{-13} \text{ A}^2$ . Con este valor se obtiene una relación señal a ruido de 50 dB
- De los resultados prácticos, y usando la Ec. (15), se calcula una pérdida total por los acoplamientos de 5.82 dB.
- Se despeja  $P_r$  de la Ec. (17), considerando el valor de ruido de ajuste

$$P_r = \sqrt{\frac{2 * \left[ \text{antilog} \left( \frac{S}{N} / 10 \right) \right] * \left[ 2e I_o B + \frac{4kTB}{R_e} + 2.5 \times 10^{-13} \right]}{m^2 R_o^2}} \quad (18)$$

- Se calcula  $P_r$  para una relación señal a ruido de 46 dB, valor mínimo para transmitir video analógico. El resultado es - 3.25 dBm.

- El resultado anterior se sustituye en la Ec. (15), obteniendo una longitud de alcance de 5.51 Km.

Del procedimiento anterior, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 3.


S/N (dB)	L (Km.)
50	0.500
46	5.51

TABLA 3 LONGITUD MÁXIMA DE TRANSMISIÓN DE LA SEÑAL LUMINOSA

## 7 Conclusiones

El enlace optoelectrónico emplea una fibra óptica, con una longitud de 500m y una atenuación de 0.4 dB/Km. Por tanto, la señal transmitida sólo es atenuada por las pérdidas causadas por dos conectores ópticos. La atenuación es de aproximadamente 5.82 dB. La fibra óptica usada no afecta de manera determinante en el sistema construido por su corta longitud.

La relación señal a ruido calculada (71.59dB) contra la relación señal a ruido medida (50dB) muestra una gran diferencia. Por lo general, los cálculos de este parámetro son halagadores, sin embargo, en las mediciones debe considerarse que tanto el transmisor como el receptor fueron alimentados por las mismas fuentes, entonces, el ruido generado por cada etapa es dis-

tribuido a todo el sistema por las líneas de alimentación. Además el sistema fue construido sobre tablas de proyecto prototipo, como se puede observar en las diferentes fotografías mostradas, por tanto, es útil hacer pruebas del sistema con su circuito impreso, de esta manera se mejorará la relación señal a ruido experimental 

## 4.7 Referencias

- [1] Jean Pierre Nerou, "Introducción a las telecomunicaciones por fibra óptica", Ed. Trillas, Primera edición, 1991, pp. 118-129.
- [2] C. P. Sandbank, "Optical fibre communication systems", John Wiley & Sons, 1980, pp. 187.
- [3] National Semiconductor Corporation, "Comlinear CLC446 400 MHz, 50 mW *Current-Feedback Op. Amp.*, pp 1-10, <http://www.national>
- [4] Charles A. Vergers, "Handbook of electrical noise: Measurement and Technology", Tab Books, 1979, pp. 62-67.
- [5] Idem [3], pp. 82-84.
- [6] Idem [15], pp. 247-249.
- [7] John Gowar "Optical communication systems", Prentice Hall International, 1984, pp. 411.

**Felipe de Jesús Rivera López**

*Profesor-investigador*

*Universidad Tecnológica de la Mixteca*