

# Estudio de la Forma de Pulso Óptima en Sistemas WDM para Área Metropolitana

Carmina del Río Campos<sup>(1)</sup>, Paloma R. Horche<sup>(2)</sup>.

<sup>(1)</sup> Dpto. de Sistemas de Información y Comunicación Universidad. San Pablo CEU. Avda Montepríncipe s/n. (carmina.eps@ceu.es)

<sup>(2)</sup> Dpto. de Tecnología Fotónica. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria. Madrid. (phorche@tfo.upm.es)

**Abstract** — The proliferation of high-bandwidth applications has created a growing interest in upgrading networks to deliver broadband services to homes and small businesses between network providers. There has to be a great efficiency between the total cost of the infrastructures and the services that can be offered to the end users. They are far more sensitive to equipment costs, requiring the use of low-cost optical components. Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM) is an ideal solution to the tradeoff between cost and capacity. This technology uses all or part of the 1270 to 1610 nm wavelength fiber range with optical channel separation about 20 nm. This channel separation allows the use of low-cost directly modulated lasers (DML) not cooled. In this paper, by means of Optical Communication System Design Software, a detailed study of pulse shape for 2.5-Gb/s wavelength-division-multiplexing metropolitan area networks is performed to evaluate their tolerance to linear impairments such as signal-to-noise-ratio degradation and dispersion. Point-to-point links are investigated, and optimum design parameters are obtained. Through extensive sets of simulation results, it is shown that some of these shape pulses are more tolerant to dispersion when compared with conventional Gaussian-shape pulses. In order to achieve low Bit Error Rate (BER), different types of optical transmitters are considered, including strongly adiabatic chirp dominated and strongly transient chirp dominated DMLs. Also, we have used fibers with different dispersion characteristics, showing that the system performance depends strongly on the chosen DML-fibre.

## I. INTRODUCCIÓN

El primer paso en el diseño de un sistema de Comunicaciones Ópticas es decidir cómo convertir la señal eléctrica en la secuencia binaria que se pretende enviar a través del canal óptico, ésta debe ser convertida mediante un generador de pulsos eléctricos en un código RZ, sin retorno a cero, o NRZ, con retorno a cero con una forma de pulso determinada. Por otro lado, el generador de pulsos puede ser aplicado directamente como corriente de ataque del láser empleado como fuente óptica (a esto se le denomina modulación directa), o aplicarlo a un modulador externo dejando que el láser emita en continua.

En sistemas aplicados a redes de área metropolitana, donde el coste debe ser reducido, se suele adoptar la configuración de modulación directa del láser (DML). Esto lleva asociado un problema adicional, ya que la modulación directa del láser provoca una variación en la frecuencia óptica instantánea de emisión (fenómeno conocido como *chirp* en frecuencia) y un ensanchamiento de su espectro que repercute en el balance dispersivo del sistema. El *chirp* introducido depende del tipo de láser empleado.

En la mayoría de los estudios teóricos relacionados con la transmisión de pulsos a través de una fibra óptica suponen que el generador de pulsos proporciona una distribución gaussiana en el tiempo. No obstante, la forma del pulso que va a gobernar el comportamiento del láser para generar la secuencia de bits se puede modelar según diferentes expresiones matemáticas, como pueden ser la senoidal, exponencial, lineal etc.

En este trabajo, mediante un software de simulación de enlaces ópticos, se estudia la calidad de un sistema CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing) modulado directamente en función de diferentes formas de pulso, con el objeto de determinar cuál de ellas es la forma óptima. También, y debido a la influencia que tienen los sistemas modulados directamente con el tipo láser utilizado, se presentarán los resultados obtenidos con DML's de distintas características.

## II. FUNDAMENTO TEÓRICO

Cuando un pulso atraviesa un medio dispersivo, como es la fibra óptica, experimenta un cambio en su forma que en gran medida determina la calidad del sistema.

La forma de un pulso gaussiano tras recorrer una distancia  $z$  a través de una fibra se puede calcular como:

$$A(\xi, t) = \frac{A_0}{\sqrt{b_f}} \exp \left[ -\frac{(1 + iC_1)t^2}{2T_0 b_f^2} + \frac{i}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\xi}{1 + C\xi} \right) \right] \quad (1)$$

Donde el parámetro  $\xi = z/LD$  es la distancia normalizada,  $LD = (T_0)^2 / |\beta_2|$ , siendo  $T_0$  el ancho relacionado con el FWHM (full width at half maximum) y  $C$  es el *chirp* inicial del pulso. Los parámetros  $b_f$  y  $C_1$  varían con  $\xi$  según las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} b_f(\xi) &= \left[ (1 + sC\xi)^2 + \xi^2 \right]^{1/2} \\ C_1(\xi) &= C + (s(1 + C^2))\xi \end{aligned} \quad (2)$$

Donde “ $s$ ” es el signo de  $\beta_2$  y tomará valores de  $+1$  ó  $-1$  dependiendo de si el pulso se propaga por una región de dispersión normal o anómala.

En la práctica las formas de los pulsos pueden no ser gaussianos. En ese caso, no pueden ser correctamente caracterizados por su FWHM, y se deben tratar mediante su valor cuadrático medio (RMS) definido por la expresión siguiente:

$$\sigma_p = \left( \langle t^2 \rangle - \langle t \rangle^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

donde:

$$\begin{aligned} \langle t \rangle &= \frac{-i}{N} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}^* \frac{\partial \tilde{A}}{\partial \omega} d\omega & \langle t^2 \rangle &= \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{\infty} \left| \frac{\partial \tilde{A}}{\partial \omega} \right|^2 d\omega & N &\equiv \int_{-\infty}^{\infty} \left| \tilde{A}(z, \omega) \right|^2 d\omega \end{aligned} \quad (4)$$

De forma que cuando los fenómenos no lineales son insignificantes, las diferentes componentes espectrales se propagan dentro de la fibra de acuerdo con la relación:

$$\tilde{A}(z, \omega) = \tilde{A}(0, \omega) \exp[i\beta z] \quad (5)$$

y la ecuación (1) se simplifica quedando:

$$\sigma_p^2(L) = \sigma_0^2 + \left[ \langle \tau^2 \rangle - \langle \tau \rangle^2 \right] + 2 \left[ \langle \tau \theta_\omega \rangle - \langle \tau \rangle \langle \theta_\omega \rangle \right] \quad (6)$$

Donde  $\sigma_0$  es el ancho RMS de los pulsos de entrada,  $\theta_\omega = d\theta/d\omega$ ,  $\tau$  el retardo de grupo para una fibra de longitud  $L$  y los signos  $\langle \rangle$  denotan, en esta ocasión, la media sobre el espectro de entrada del pulso tales que:

$$\langle f \rangle = \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{\infty} f(\omega) S^2(\omega) d\omega \quad (7)$$

Es decir, la deformación y el ancho del pulso en su recorrido a través de la fibra, y por tanto la calidad final que se puede obtener en un sistema, depende; de la forma del pulso a la entrada de la fibra; del chirp asociado a dicho pulso (que a su vez dependerá directamente del tipo de fuente óptica empleado en la implementación del sistema) y; de las características de dispersión de la fibra.

En este trabajo, se plantea el estudio de un enlace WDM concreto en el que se utilizarán distintos transmisores (con diferentes características de chirp asociado), fibras con diferentes signos de dispersión en el rango de frecuencias considerado y diferentes formas de pulso. Con esto se pretende evaluar la forma de pulso que resulta óptima en función de las fibras y

transmisores de que se disponga. El análisis se realiza para un único canal del sistema WDM propuesto, pero en las simulaciones realizadas se mantienen en funcionamiento todos los canales, así como el resto de componentes necesarios para su implementación, ya que las propiedades de chirp del pulso propagado por el medio de transmisión pueden variar en función de las características de componentes selectivos en longitud de onda como es el caso de los multiplexores, demultiplexores y filtros utilizados típicamente en los sistemas WDM.

### III. MODELADO DEL SISTEMA

Para este estudio, se propone un esquema como el mostrado en la figura 1. La figura 2 muestra un esquema del transmisor utilizado para cada canal ( $\lambda_n$ ) que está formado por un láser modulado directamente (DML) no refrigerado, un generador de señales aleatorias que determina la secuencia de bits enviados y que es transformado en pulsos eléctricos con formato NRZ y 128-bit OC-48 (2.5Gb/s). Se han realizado diferentes simulaciones variando la forma del pulso en el generador de pulsos eléctricos. El resto de componentes del sistema se mantienen constantes en todas las simulaciones.

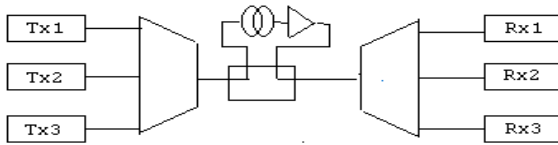


Figura 1. Esquema del sistema propuesto.

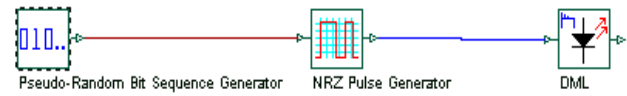


Figura 2. Estructura del transmisor modulado directamente

En los transmisores se han utilizado como canales de salida las longitudes de onda centradas en 1531 nm, 1551 nm y 1571 nm de acuerdo con la Recomendación ITU-T G. 694.2 y para realizar el análisis comparativo se ha seleccionado el canal a 1551 nm. Se han empleado dos tipos de fibras con características similares a fibras comerciales. La denominada SMF con un coeficiente de dispersión cromática positivo y la NZ-NDP, con dispersión negativa en todo el rango de frecuencias estudiado. En ambas fibras, se ha suprimido el pico de atenuación a 1.38  $\mu\text{m}$  debido a los iones OH y los valores de la pendiente de dispersión, el área efectiva, el índice de refracción no lineal y el retardo de grupo se han tomado según indican las recomendaciones G.652 y G.655. El sistema está formado por dos tramos, cada uno formado un 100 Km de fibra óptica y por un amplificador EDFA, de 18 dB de ganancia, 4 dB de factor de ruido. Como receptor se ha considerado un diodo PIN al que se le ha conectado un filtro de Bessel paso bajo para eliminar el ruido de alta frecuencia. El multiplexor cuenta con un ancho de banda suficiente para que no filtre el espectro de la señal cuando el chirp asociado a las señales provoque un desplazamiento en el espectro.

La calidad de la transmisión de los sistemas es a menudo caracterizada por su BER (bit error rate). En la actualidad, cuando se instalan nuevos sistemas, la calidad requerida es  $10^{-15}$ . La medida experimental directa de un BER tan bajo suele tomar un tiempo considerable y ser sofisticada y costosa. Una forma más sencilla de estimar el BER es mediante el cálculo del factor-Q del sistema, que puede ser modelado de una forma más sencilla que el BER. La relación entre ambos parámetros es definida mediante la expresión siguiente [1]:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \approx \frac{\exp \frac{-Q^2}{2}}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (8)$$

Así, y con el fin de comparar la calidad de los diferentes sistemas simulados, se calcula el factor Q, partiendo del diagrama de ojo de cada caso. El factor Q viene dado según la siguiente expresión

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (9)$$

donde  $\mu_i$  y  $\sigma_i$  son la media y la varianza asociadas a un "1" y un "0".

Con el objeto de evaluar la forma de pulso que resulta óptima, en el sistema propuesto, se van a analizar formas de pulso exponenciales, gaussianas y senoidales. Las ecuaciones que gobiernan estos modelos para los tres casos considerados son:

<i>Exponencial</i>	<i>Gaussiana</i>	<i>Senoidal</i>	
$E(t) = \begin{cases} 1 - e^{-(t/c_r)} \rightarrow 0 \leq t \leq t_1 \\ 1 \rightarrow t_1 \leq t \leq t_2 \\ e^{-(t/c_f)} \rightarrow t_2 \leq T_b \end{cases}$	$E(t) = \begin{cases} 1 - e^{-(t/c_r)^2} \rightarrow 0 \leq t \leq t_1 \\ 1 \rightarrow t_1 \leq t \leq t_2 \\ e^{-(t/c_f)^2} \rightarrow t_2 \leq T_b \end{cases}$	$E(t) = \begin{cases} \sin(\pi / c_r) \rightarrow 0 \leq t \leq t_1 \\ 1 \rightarrow t_1 \leq t \leq t_2 \\ \sin(\pi / c_f) \rightarrow t_2 \leq T_b \end{cases}$	(10)

Donde  $C_r$  es el coeficiente del tiempo de subida (tiempo desde que la señal toma el 10% de su valor final hasta que alcanza el 90 % del mismo) y  $C_f$  el de bajada (tiempo desde que la señal toma el 90% de su valor final hasta que alcanza el 10 % del mismo) y  $T$  es el periodo de bit.

#### IV. SMULACIONES Y RESULTADOS

En nuestro estudio se consideran 4 sistemas diferentes, constituidos por dos tipos de láseres y dos tipos diferentes de fibra, con distinto signo en el coeficiente de dispersión, existentes en el mercado actual de las comunicaciones ópticas y se realizan las cuatro combinaciones posibles. Los láseres que se emplean son láseres modulados directamente: DML1: con *chirp* adiabático dominante y otro, DML2 con un *chirp* transitorio dominante [2].

Se analizan los cuatro sistemas, modificando, para cada uno de ellos la forma del pulso. Los dos primeros, utilizan el láser DML1 y las fibras estándar SMF y la NZ-NDF (dispersión positiva/negativa para la banda de frecuencias estudiadas en la simulación), respectivamente. En los otros dos, se repite el mismo esquema sustituyendo el láser por el DML2.

Las figuras 3 (a) y (b) representan el factor de calidad en función de la potencia para los tres modelos de forma de pulso estudiados, utilizando un láser con un *chirp* dominante adiabático del tipo DML1 y fibras NZ-NDF y SMF, respectivamente. En ambas figuras se observa que, sea cual fuera el tipo de fibra empleada, el sistema presenta un valor máximo de calidad para una determinada potencia de salida de los DML [3,4] de valor similar independientemente del modelo de pulso utilizado en la simulación. Utilizando los láseres DML1, el peor resultado se obtiene siempre para la forma de onda que utiliza el modelo gaussiano, obteniéndose valores de calidad similares en los otros dos casos.

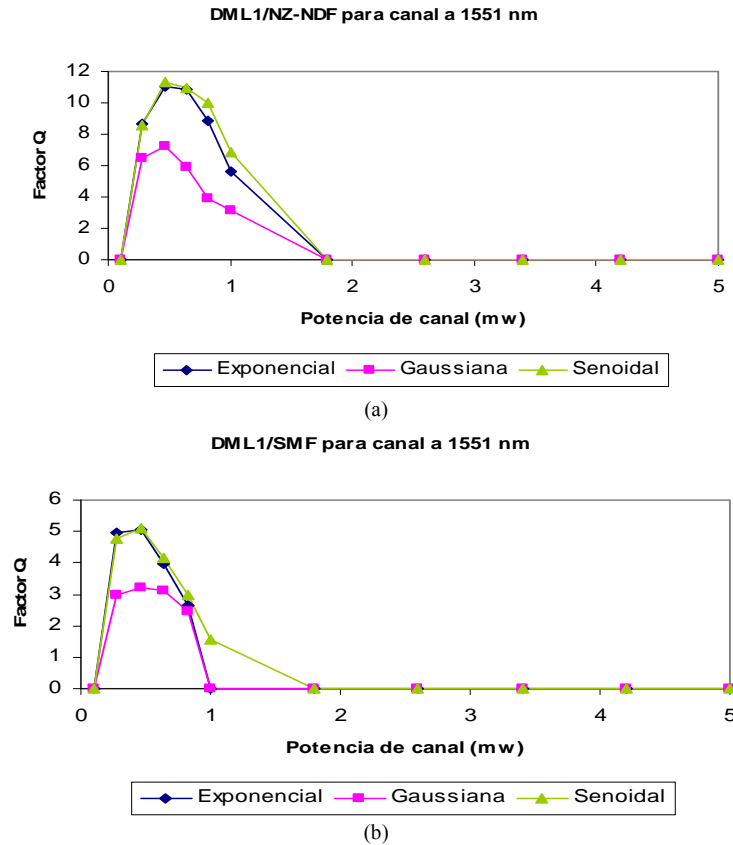


Figura 3. Factor de calidad de sistemas empleando fuentes DML1 y con fibra (a) NZ-NDF y (b) SMF.

Se puede observar que para bajas potencias de entrada, el sistema está limitado por su balance de pérdidas y el comportamiento de los tres modelos es similar. La diferencia entre ellos comienza a ser relevante en el momento en el que la dispersión temporal del pulso es el factor limitante del sistema y, por tanto, el *chirp* y la forma del pulso son los efectos predominantes. En esa situación, el pulso gaussiano es el que más acusa el *chirp* adiabático; frecuencia distinta entre los “1” y los “0”, provocando un desplazamiento en el tiempo entre los niveles correspondientes a “1” y “0” cuando el pulso atraviesa un medio dispersivo como es la fibra óptica.

En la figura 4 se muestran los factores de calidad del sistema bajo estudio en el caso de utilizar en la simulación láseres que se han denominado DML2 y que presenta un chirp dominante transitorio. En esta gráfica se puede observar que nuevamente se obtienen mínimos de calidad para el modelo gaussiano, no llegando en ningún caso al mínimo exigido ( $BER = 10^{-9}$ ), hay que mencionar que en los sistemas más actuales de comunicaciones ópticas el BER mínimo que se está exigiendo es de  $10^{-14}$ . La figura 4 muestra el factor de calidad en función de la potencia óptica de salida del láser DML2 para el canal centrado en una longitud de onda de 1551 nm y en el caso de realizar la simulación con la fibra NZ-DSF que posee dispersión negativa y con un valor absoluto inferior a la SMF.

De los resultados de la simulación se puede observar que el modelo que utiliza forma de pulso exponencial, para determinados valores de potencia óptica (en torno a los 2.6 mW), presenta mejor factor de calidad que el senoidal. La reducción de calidad que supondría utilizar el modelo de pulso senoidal con respecto al exponencial sería de aproximadamente del 25% y del 83% con respecto al modelo gaussiano. Esta diferencia de calidad se debe, entre otros factores, a que el tiempo de respuesta del láser es mayor cuando se le aplican corrientes de excitación con forma gaussiana [5]. Esta diferencia de tiempos, unido a las deformaciones que se producen en el pulso óptico debido a las características dispersivas de la fibra que atraviesa, provoca un cierre en el diagrama de ojo con la consecuente pérdida de calidad de transmisión. Estos factores determinan las diferencias que existen entre los distintos sistemas simulados.

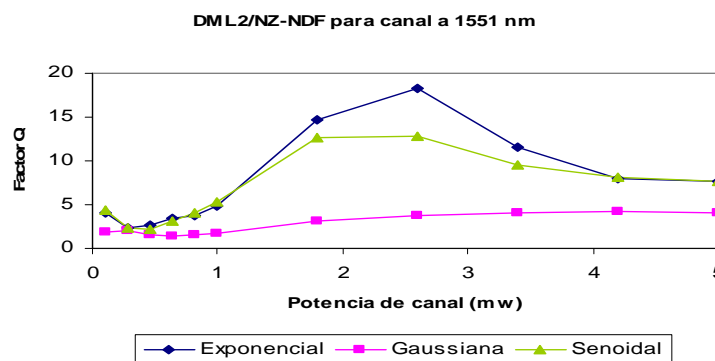


Figura 4. Factor de calidad en función de la potencia para sistema empleando DML2 y fibra NZ-NDF.

La figura 5 muestra los pulsos ópticos generados por el DML2 para corrientes de modulación con forma exponencial, senoidal y gaussiana cuando se está emitiendo una señal de 5 mW de potencia. Los modelos exponencial y senoidal presentan picos de sobremodulación mayores que en el caso gaussiano pero sus tiempos de respuesta son mejores por lo que su comportamiento dispersivo será mejor.

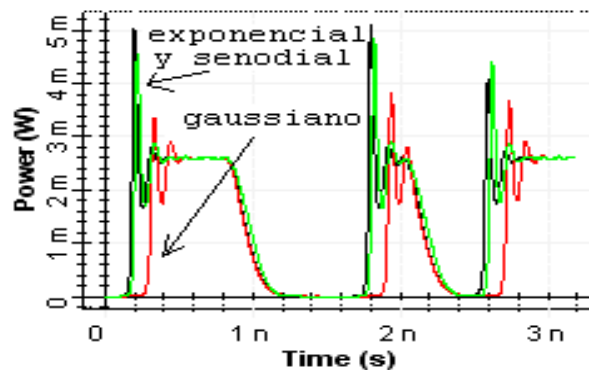


Figura 5. Forma de los pulsos ópticos a la salida del láser tipo DML2 para los tres tipos de pulsos.

La figura 6 representa el diagrama de ojo para los casos; (a) exponencial y (b) senoidal, cuando la fibra utilizada en el enlace es del tipo NZ-DSF con un coeficiente de dispersión negativo. Comparando figuras, se observa gran similitud cualitativa en las formas de los diagramas de ojo. Sin embargo existe una diferencia clara de calidad. En el modelo senoidal se obtienen un *factor de calidad Q* de 13 mientras que para el modelo exponencial se logra un *factor de calidad Q* de 18,5. Esta diferencia no es tanta en el caso de emplear una fibra con un coeficiente de dispersión positivo, del tipo SMF, obteniéndose en ambos casos un *factor de calidad Q* ligeramente superior a 6.

La figura 6 (c) muestra el diagrama de ojo de correspondiente al sistema implementado con el láser DML2, la fibra NZ-NDF de dispersión negativa y forma de pulso gaussiana. En este caso, el *factor de calidad Q* obtenido, para cualquiera de las potencias ópticas con las que se está trabajando, no llega a superar un  $Q = 4$ , valor que es totalmente inadmisibles en los sistema de comunicaciones ópticas actuales. Una de las causas por las que sucede esto, como se puede observar en este diagrama, se debe a que la máxima apertura del ojo se produce en momentos diferentes dentro del periodo de bit. En concreto, para el modelo gaussiano, dicho máximo se produce prácticamente al final del periodo de bit considerado, estando mucho más centrado en el modelo exponencial. Este desplazamiento relativo del valor en el que se produce la máxima apertura en el ojo provoca errores en el reconocimiento de los pulsos en recepción.

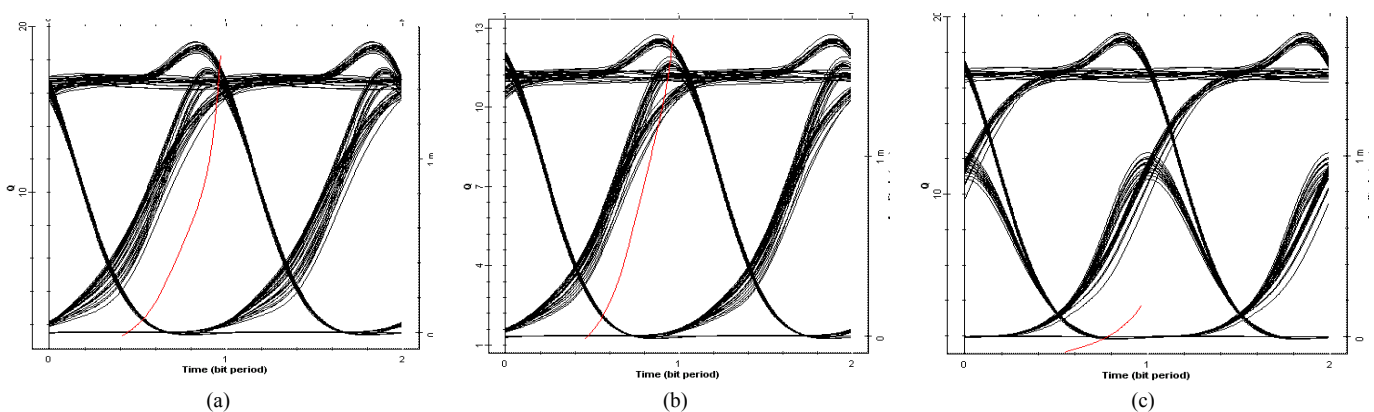


Figura 6. Diagrama de ojo correspondiente al sistema DML2 con fibra NZ-NDF y forma de pulso forma (a) exponencial, (b) senoidal y (c) gaussiana.

Para finalizar, se simuló el enlace de la figura 1 utilizando como láser el DML2 (*chirp* transitorio dominante) y una fibra SMF con dispersión dispersión positiva en todo el rango de trabajo. Hay que recordar que la fibra SMF se ha diseñado cumpliendo los requisitos de la *Rec. ITU-T G. 652* por lo que el valor de su coeficiente de dispersión cromática a una longitud de onda de 1551 nm, es de aproximadamente 17 ps/Km-nm, es decir, bastante superior en valor absoluto al de la fibra NZ-DSF. En la figura 7, se muestra el *factor de calidad Q*, en función de la potencia óptica de salida del DML2, para los modelos senoidal, gaussiano y exponencial. Como sepuede obsevar, los modelos exponencial y senoidal presentan comportamientos muy similares en cuanto a la calidad del sistema, siendo el peor caso, nuevamente, el gaussiano.

No obstante, ninguno de ellos cumple con la suficiente calidad por lo que el diseño del sistema deberá ser modificado, disminuyendo la longitud del mismo, ya que la solución de aumentar la potencia de los emisores para abarcar más distancia, no es aplicable en este caso, como se puede observar en la gráfica de la figura 7, un aumento de potencia óptica lleva aparejado una disminución de la calidad total del sistema.

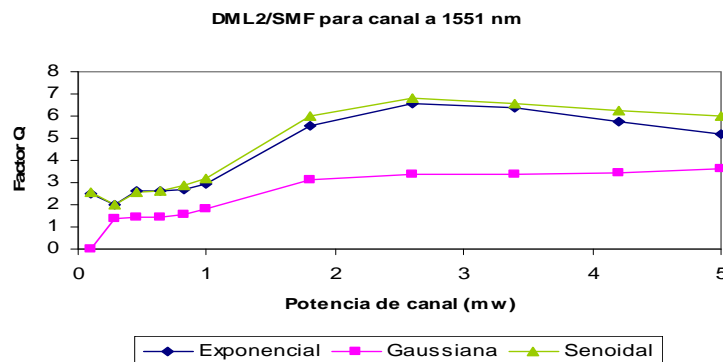


Figura 7. Factor de calidad en función de la potencia para sistema empleando DML2 y fibras (a) NZ-NDF y (b) SMF.

## V. CONCLUSIONES.

En este estudio se analiza la dependencia de la calidad de un sistema CWDM modulado directamente con respecto a la forma del pulso óptico enviado a través de la fibra. Se ha comprobado que los DML con *chirp* adiabático dominante (DML1) presentan peor comportamiento (*factor Q* reducido) para todas las formas de pulso, siendo el caso peor para los sistemas que utilizan fibras estándar en las que el coeficiente de dispersión cromática es positivo y grande (17 psKm/nm). En este caso el *factor Q* obtenido no supera el valor mínimo exigido para conseguir un BER de  $10^{-9}$ .

En general, se ha demostrado que el peor comportamiento se corresponde con una forma de pulso gaussiana y que, si el láser utilizado tiene un comportamiento transitorio dominante (DML2), el signo del coeficiente de dispersión cromática de la fibra es determinante a la hora de seleccionar la forma de pulso que proporciona los mejores valores de calidad.

Dado que el modelo gaussiano es el más restrictivo en cuanto a calidad se refiere pero, por otro lado, es el que matemáticamente resulta más fácil de manejar, se podría utilizar dicho modelo para realizar todos los cálculos previos en el diseño de sistemas de comunicaciones ópticas y se podría garantizar que cualquier otro modelo considerado superará las condiciones mínimas de calidad requeridas.

## REFERENCIAS

- [1] S. B. Alexander. "Optical Communication Receiver Design". SPIE Press/ IEE, 1997
- [2] Measurements of laser rate equation parameters for simulating the performance of directly modulated 2.5 Gb/s Metro area transmission systems and networks. Tomkos, I.; Roudas, I.; Boskovic, A.; Antoniadis, N.; Hesse, R.; Vodhanel, R. Lasers and Electro-Optics Society 2000 Annual Meeting. LEOS 2000. 13th Annual Meeting. IEEE. Volume 2, Issue , 2000 Page(s):692 - 693 vol
- [3] Carmina del Río y P. Horche. "Enhanced Performance of WDM Systems using Directly Modulated Lasers on Positive Dispersion Fibers". Optical Fiber Technology. 10 April 08.
- [4] Linewidth rebroadening in DFB lasers due to bias dependent dispersion of feedback, Morthier, G.; David, K.; Baets, R. Electronics Letters Volume 27, Issue 4, 14 Feb 1991 Page(s):375 - 377
- [2] H. Ghafouri-Shiraz. Distributed Feedback Laser Diodes and Optical Tunable Filters. John Wiley And Sons, 2003
- [5] L.A. Coldren and S.W. Corzine. "Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits". Wiley Series in Microwave and optical Engineering. 1995