

La fibra óptica y los efectos limitadores de los sistemas de comunicación ópticos

Simó Graells

PID_00175709

Índice

1. Luz y fibra óptica bajo la aproximación de la óptica de rayos.....	5
2. Efectos clásicos limitadores de las comunicaciones ópticas...	10
2.1. Pérdidas en los sistemas de comunicaciones ópticas	10
2.2. Dispersión en los sistemas de comunicaciones ópticas	13
3. Tipos de fibras ópticas.....	17
3.1. Fibra multimodo	17
3.2. Fibra monomodo	18
3.3. Normativas sobre fibra óptica	19
4. Propagación de la luz por la fibra óptica. Análisis desde el punto de vista de la óptica electromagnética.....	21
4.1. Óptica electromagnética	21
4.2. La ecuación general de propagación de la luz por la fibra óptica	22
4.3. Solución gráfica a la ecuación general de propagación de la luz por la fibra óptica	23
4.4. Ejemplos sobre propagación de señales por la fibra óptica	26
4.4.1. Ejemplo I	26
4.4.2. Ejemplo II	27
4.4.3. Ejemplo III	29
4.4.4. Ejemplo IV	31
4.4.5. Ejemplo V	35
5. Efectos no lineales.....	40
5.1. Ganancia no lineal y parámetros del sistema	40
5.2. Efecto Raman	43
5.3. Efecto Brillouin	45
5.4. Efecto CIP	46
5.5. Efecto FWM	46
6. Ejemplos de cálculo de los efectos limitadores de enlaces de comunicaciones ópticas.....	48
6.1. Ejemplo I	48
6.2. Ejemplo II	58
6.3. Ejemplo III	63
6.4. Ejemplo IV	66
6.5. Ejemplo V	70
Bibliografía.....	73

1. Luz y fibra óptica bajo la aproximación de la óptica de rayos

La luz se define como aquel fenómeno (onda o corpúsculo) electromagnético que estimula el sentido de la visión. Esta definición es ampliable a la banda de los ultravioletas y a la banda de los infrarrojos, que no estimulan el sentido de la visión pero también se consideran luz.

Hay varios niveles de profundización en el estudio de la luz: la óptica de rayos, la óptica de ondas, la óptica electromagnética y la óptica cuántica. El estudio de la luz más superficial es la óptica de rayos. En este nivel, la luz se trata como un haz representado con un rayo y que viene determinado por desplazarse por un medio en una dirección y un sentido concretos. Estudiar el comportamiento de la luz en medios guiados como la fibra óptica desde la perspectiva de la óptica de rayos es conceptualmente sencillo por las aproximaciones que se llevan a cabo, pero también es limitado y a veces se ajusta poco a la realidad.

La óptica de ondas considera que el rayo de luz se comporta como una onda (con una forma armónica) con una determinada amplitud, frecuencia y fase. La óptica electromagnética trata la onda como una onda electromagnética y, por lo tanto, formada por un campo eléctrico y un campo magnético ortogonales entre sí y que se rigen por las ecuaciones de Maxwell. En este curso, emplearemos la óptica electromagnética para estudiar el guiado de la luz por la fibra óptica. Por último, la óptica cuántica utiliza la mecánica cuántica para estudiar los fenómenos que implican a la luz. Normalmente, la óptica cuántica se emplea para estudiar algunos componentes utilizados en comunicaciones ópticas como, por ejemplo, los emisores láser.

En este apartado, nos centramos en el estudio de la luz y de la fibra óptica considerando la óptica de rayos. Algunas de las conclusiones a las que llegaremos deberemos revisarlas más adelante, cuando llevemos a cabo el mismo análisis empleando la óptica electromagnética.

Al efectuar un estudio de la luz, siempre es necesario tener en cuenta el medio material por el que se propaga, que queda caracterizado, entre otros parámetros, por el índice de refracción (n). El índice de refracción relaciona la velocidad de la luz en el vacío (c_0) con la velocidad de la luz en el medio (c).

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (1)$$

Infrarrojo cercano

La banda frecuencial utilizada en los sistemas de comunicaciones ópticas es el infrarrojo cercano, y se trata de luz no visible.

Referencia bibliográfica

B. E. A. Saleh; M. C. Teich (2007). *Fundamentals of Photonics*. Wiley.

Los materiales que se encuentran en la naturaleza tienen un índice de refracción positivo y mayor que la unidad, dado que la velocidad de la luz en el vacío es mayor que la velocidad de la luz en el medio o en el material.

Un principio fundamental para aplicar en óptica es el de Fermat. Este principio enuncia que la luz pasa por el camino que tarda el tiempo mínimo. Como consecuencia, la luz, cuando viaja por un medio homogéneo (las mismas propiedades físicas en todos los puntos del espacio), lo hace en línea recta. Además, si la luz se encuentra con un espejo, esta se refleja y, dado que se encuentra en el mismo medio, lo hace con un ángulo de salida igual que el ángulo incidente.

Una de las consecuencias más importantes del principio de Fermat es la ley de Snell. La ley de Snell enuncia que si tenemos dos medios diferentes (con distintos índices de refracción) y la luz incide sobre la transición entre los dos medios, parte de la luz se reflejará hacia el medio desde donde incide el rayo y parte de la luz se refractará hacia el otro medio. El ángulo reflejado y el ángulo incidente serán los mismos, puesto que los dos haces de luz continúan estando en el mismo medio. La relación entre el ángulo refractado (el que se propaga por el otro medio) y el ángulo incidente tiene lugar a través de los índices de refracción de los dos medios, y queda definida mediante la ley de Snell¹.

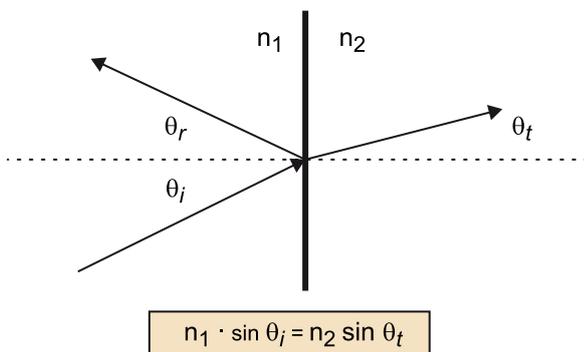


Figura 1. Transición entre dos medios. Ley de Snell

Teniendo en cuenta la expresión matemática de la ley de Snell, nos podemos encontrar con dos casos. Si el índice de refracción del primer medio es menor que el del segundo medio (caso 1), entonces el ángulo transmitido (o refractado) será menor que el ángulo incidente y el rayo estará más cercano a la perpendicular de la transición entre los dos medios. Por otro lado, si el índice de refracción del primer medio es mayor que el del segundo medio (caso 2), entonces el ángulo transmitido será mayor que el ángulo incidente y el rayo estará más cercano a la transición entre los dos medios.

Metamateriales

Hay materiales que bajo determinadas condiciones pueden tener un índice de refracción negativo: los metamateriales. El estudio de este tipo de materiales es uno de los campos de investigación más prometedores dentro del ámbito de la fotónica.

⁽¹⁾Tened en cuenta que los ángulos están definidos como el ángulo entre el haz de luz y la transición entre los dos medios.

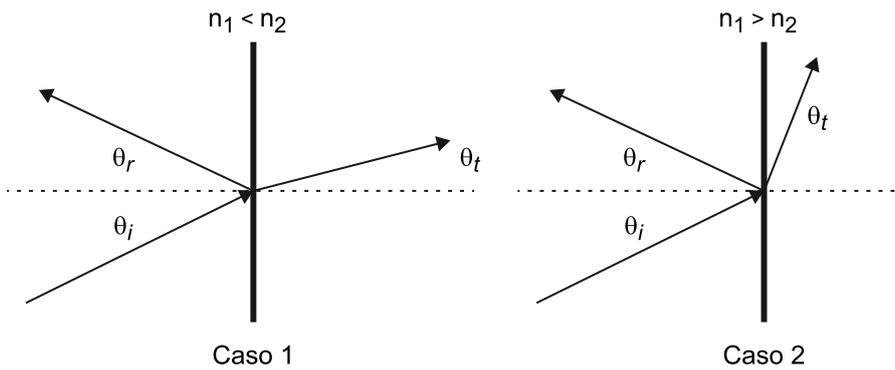


Figura 2. Casos en una transición entre dos medios

Centrándonos en el caso 2, y teniendo en cuenta que al aumentar el ángulo de incidencia aumentamos también el ángulo transmitido, se llegará a la situación de que para un determinado ángulo de incidencia que será menor de 90 grados, el ángulo transmitido será de 90 grados. Este ángulo se denomina ángulo crítico. Hay que tener en cuenta que bajo la condición de ángulo crítico, y también para ángulos superiores al ángulo crítico, el rayo de luz transmitido no se propaga por la transición entre los dos medios, sino que se refleja. Esta situación es lo que se denomina reflexión total. En el caso de la reflexión total, la transición se comporta igual que si se tratara de un espejo.

A partir la ley de Snell, se extrae que el ángulo crítico será:

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

Observemos que el ángulo crítico es un parámetro que es función solo de parámetros (n_1 y n_2) de los materiales que empleamos.

La condición de reflexión total será la siguiente.

$$\theta_i \geq \theta_c \quad (3)$$

Una vez que conocemos la propiedad de la reflexión total, ya estamos en condiciones de ver cómo se propaga la luz por una fibra óptica bajo la aproximación de la óptica de rayos.

Una fibra óptica es una guía de ondas de estructura cilíndrica, que está formada por un cilindro interno denominado núcleo, con un índice de refracción n_1 y rodeado por un revestimiento (también cilíndrico) con un índice de refracción n_2 . En la figura siguiente, se muestra un corte longitudinal y un corte transversal de una fibra óptica.

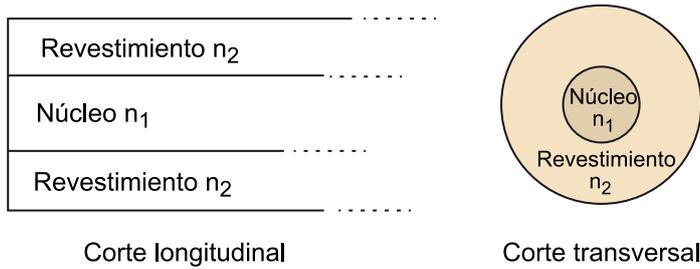


Figura 3. Estructura de la fibra óptica

La estructura formada por un núcleo y un revestimiento con índices de refracción diferentes tiene la finalidad de guiar la luz por el interior del núcleo. Este guiado se basa en la propiedad de la reflexión total, que se produce en la transición entre el núcleo (n_1) y el revestimiento (n_2). Para que la propagación se pueda llevar a cabo, es preciso que se cumpla una condición indispensable: $n_1 > n_2$. Los rayos que se guían por la fibra óptica deben cumplir la condición de reflexión total y, por lo tanto, es necesario que lleguen a la transición entre núcleo y revestimiento con un ángulo de incidencia $\theta_i \geq \theta_c$. Si no es así, parte de la luz se refracta hacia el revestimiento y después de unos pocos rebotes, el haz de luz se acaba perdiendo.

En la figura siguiente, vemos el ejemplo de un rayo guiado y un rayo no guiado por la fibra óptica.

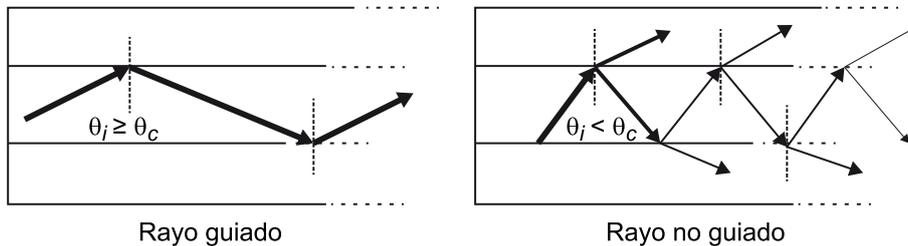


Figura 4. Guiado de rayos en una fibra óptica

La apertura numérica es un parámetro asociado a obtener el ángulo crítico dentro de la fibra óptica. Este lo suele proporcionar el fabricante en las especificaciones de la fibra óptica, de modo que da una idea del margen de ángulos por los que podemos introducir luz dentro de la fibra.

La expresión de la apertura numérica es la siguiente.

$$NA = n_0 \sin \theta_i = n_1 \cos \theta_c = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$NA \cong n_1 (2\Delta)^{1/2} \quad (5)$$

Lectura de la fórmula (5)

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

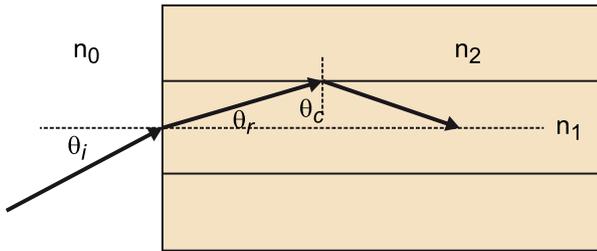


Figura 5. Apertura numérica de una fibra óptica

Fijémonos en el hecho de que una apertura numérica grande indica un ángulo máximo de luz de entrada grande y, por lo tanto, una alta capacidad de entrada de la luz dentro de la fibra. En cambio, una apertura numérica pequeña indica un ángulo máximo de luz de entrada pequeño y, por lo tanto, una baja capacidad de entrada de la luz.

2. Efectos clásicos limitadores de las comunicaciones ópticas

Los efectos más comunes que limitan los sistemas de comunicaciones ópticas son la atenuación y la dispersión.

La atenuación es la disminución de la amplitud de la señal por el hecho de pasar por un tramo de fibra. Este parámetro limita la longitud del enlace.

La dispersión es el ensanchamiento temporal de la señal por el hecho de pasar por un tramo de fibra. Este parámetro limita la longitud del enlace y la velocidad binaria de la señal.

Hay que notar que la longitud del enlace puede estar limitada tanto por las pérdidas como por la dispersión. Al diseñar un enlace de comunicaciones ópticas, será necesario evaluar los dos efectos y determinar cuál de los dos es el efecto limitador predominante.

Para evaluar el efecto de las pérdidas en un enlace, deberemos conocer cuáles son las principales fuentes de pérdidas. Aun así, para determinar el efecto que tendrá la dispersión sobre el enlace, tendremos que conocer qué tipos de dispersión hay y a qué sistemas afectan.

2.1. Pérdidas en los sistemas de comunicaciones ópticas

Las principales fuentes de pérdidas de un enlace de comunicaciones ópticas son la atenuación de la fibra; las pérdidas de los conectores y las uniones; las pérdidas debidas a la dependencia de la polarización; las pérdidas introducidas por los divisores de potencia óptica y los monitores de potencia óptica; las pérdidas debidas a desplazamientos de la señal en componentes que dependen de la frecuencia; y las no linealidades de la fibra. Además, y aunque no se trate de unas pérdidas, habrá que tener en cuenta el margen de seguridad del sistema.

En este apartado, nos centraremos en las pérdidas introducidas por la atenuación de la fibra óptica y las causas de la misma.

Hay dos tipos de causas que provocan la atenuación en la fibra óptica: las causas intrínsecas y las causas extrínsecas. Las causas intrínsecas son las propias del material con el que se fabrica la fibra óptica (dióxido de silicio). Las causas extrínsecas son las provocadas por efectos externos, como curvaturas de la fibra óptica o variaciones geométricas de la guía.

Es importante conocer las causas intrínsecas de atenuación, puesto que estas nos determinarán cuál es la atenuación de la fibra en cada frecuencia o longitud de onda. Por lo tanto, a partir de las causas podremos averiguar el comportamiento frecuencial de la fibra óptica.

Las principales causas intrínsecas son la dispersión de Rayleigh, la absorción de infrarrojos y la resonancia del ión OH.

La dispersión de Rayleigh provoca un cambio de dirección de algunos fotones del haz de luz que se propaga por la fibra óptica. Algunos de estos fotones pueden tomar direcciones que imposibilitarán el guiado de los mismos por la fibra óptica. A efectos de la señal, se provocará una disminución de la cantidad de fotones que cumplen las condiciones para propagarse y, por lo tanto, habrá una pérdida o atenuación. Este efecto es inversamente proporcional a la longitud de onda.

La absorción de infrarrojos se debe a las propiedades ópticas del material (dióxido de silicio), que absorbe la luz a partir de 1,6 μm .

Los iones OH son impurezas fruto del proceso de fabricación de la fibra óptica. Los sobretonos de la frecuencia de resonancia de los iones OH caen dentro de la banda espectral que se utiliza para comunicaciones por fibra óptica. Las longitudes de onda de resonancia se sitúan a 720 nm, 950 nm y 1.380 nm.

Teniendo en cuenta las tres causas de la atenuación intrínseca y su comportamiento frecuencial, podemos extraer la curva que nos indica la atenuación de la fibra óptica respecto de la longitud de onda:

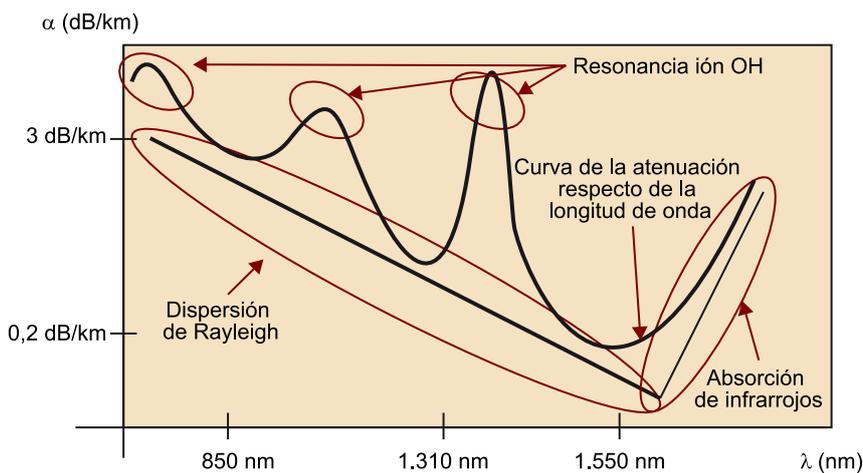


Figura 6. Atenuación de la fibra óptica

En esta curva podemos identificar claramente tres zonas donde tenemos mínimos de atenuación, que se conocen como **ventanas de la fibra óptica** y representan los márgenes de longitud de onda más apropiados para los sistemas de comunicaciones ópticas:

Rayleigh backscattering

Un caso particular de la dispersión de Rayleigh es el Rayleigh backscattering, que es la luz que se dispersa en sentido contrario a la señal (contra-propagada). En este efecto se basa el funcionamiento del reflectómetro óptico en dominio temporal (OTDR), uno de los aparatos de medida más utilizados, que estudiaremos en el módulo siguiente.

- La primera ventana se sitúa en torno a 850 nm y habitualmente se emplea para redes de área local. Se utiliza fibra multimodo (en la que la guía propaga varios modos) y los emisores acostumbran a ser del tipo LED.
- La segunda ventana se sitúa en torno a 1.310 nm y habitualmente se emplea para redes metropolitanas y enlaces cortos. Se utiliza fibra monomodo (se propaga un solo modo, denominado modo fundamental), y los emisores suelen ser del tipo láser o ELED.
- La tercera ventana se sitúa en torno a 1.550 nm y habitualmente se utiliza para redes troncales y de gran capacidad, así como para hacer enlaces a larga distancia como, por ejemplo, el cable submarino que interconecta los distintos continentes. Se utiliza fibra monomodo y los emisores acostumbran a ser del tipo láser o ELED.

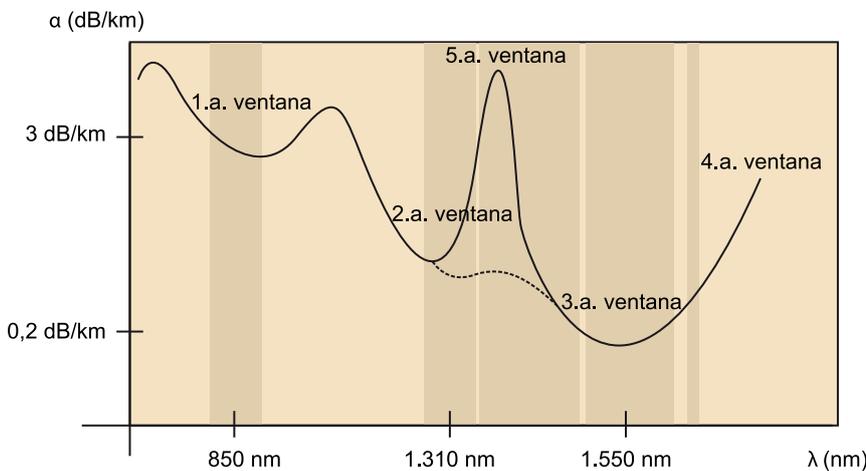


Figura 7. Ventanas de la fibra óptica

Todavía hay dos ventanas más de la fibra óptica:

- La cuarta ventana se sitúa en torno a 1.610 nm y se utiliza para monitorizar el estado de la red; acostumbra a ser la longitud de onda empleada por los OTDR que llevan a cabo un testeo de manera contenida.
- La quinta ventana se sitúa entre la segunda y la tercera ventana, y se caracteriza por su gran ancho de banda. Solo se utiliza sobre determinadas fibras. Observemos que en el margen de longitudes de onda donde está situada la ventana, tenemos una resonancia del ión OH (la de 1.380 nm): esta resonancia se ha reducido de manera sustancial, como fruto de la mejora de los procesos de fabricación de la fibra óptica.

Al diseñar un enlace de comunicaciones ópticas, habrá que considerar las diferentes fuentes de pérdidas. En el proceso de diseño, esto se traduce en llevar a cabo el balance de potencia. El balance de potencia es una ecuación propia de cada enlace que nos relaciona la potencia del emisor (P_{TX}), la sensibilidad del receptor (S_{RX}), las pérdidas (L_{total}) y el margen de seguridad (M). El margen

de seguridad indica el sobredimensionamiento lógico que hacemos al sistema para que este continúe funcionando pese al envejecimiento de los componentes o la fibra. El valor del margen de seguridad suele ser de unos 3 dB.

Para que un enlace cumpla por atenuación, será necesario:

$$P_{TX} > S_{RX} + L_{total} + M \quad (6)$$

Las pérdidas totales (L_{total}), de manera simplificada, son las siguientes:

$$L_{total} = L_{con} + L_{unión} + \alpha \cdot L \quad (7)$$

2.2. Dispersión en los sistemas de comunicaciones ópticas

La dispersión es el fenómeno por el que un pulso de luz se deforma a medida que se propaga por la fibra óptica. La dispersión se debe al hecho de que diferentes componentes de la señal viajan a velocidades distintas y, por lo tanto, llegan al receptor en distintos instantes de tiempo.

Una clasificación simplificada de la dispersión trata dos tipos de dispersión:

- La intermodal o dispersión modal.
- La intramodal o dispersión cromática.

La dispersión modal se produce entre los diferentes modos que se propagan por la fibra óptica y, por lo tanto, solo afecta a fibras multimodo. En la aproximación a la óptica de rayos, un modo se representa como la propagación con una determinada inclinación del rayo dentro de la fibra óptica. Si consideramos varios rayos con inclinaciones diferentes (modos) que se introducen de manera simultánea dentro de la fibra óptica y que recorren un tramo de fibra de una determinada longitud, al final de la fibra observaremos que los rayos no llegan de manera simultánea sino que lo hacen con cierto retraso unos de otros. Esto se debe al hecho de que aunque el tramo de fibra recorrido sea fijo, el camino interno (dentro de la fibra) de cada rayo es distinto. En consecuencia, puesto que recorren distancias diferentes y a la misma velocidad, llegan en distintos instantes de tiempo.

En la figura siguiente, se puede observar el efecto considerando solo dos modos, lo que equivaldría a dos rayos de luz. Obviamente, el rayo representado con una línea discontinua recorre internamente más distancia que el representado por la línea sólida. Aunque introduzcamos los dos en el mismo instante de tiempo y recorran la misma longitud de fibra (L), primero llegará el rayo representado por la línea sólida y más tarde lo hará el representado con la línea discontinua.

Nota

Observad que debe utilizarse con los parámetros expresados en unidades logarítmicas.

Lectura de la fórmula (7)

L_{con} : pérdidas de los conectores (normalmente consideramos uno al emisor y otro al receptor).

$L_{unión}$: pérdidas de las uniones que se emplean para unir los diferentes tramos de fibra óptica.

α : atenuación por kilómetro de la fibra óptica.

L : longitud del enlace.

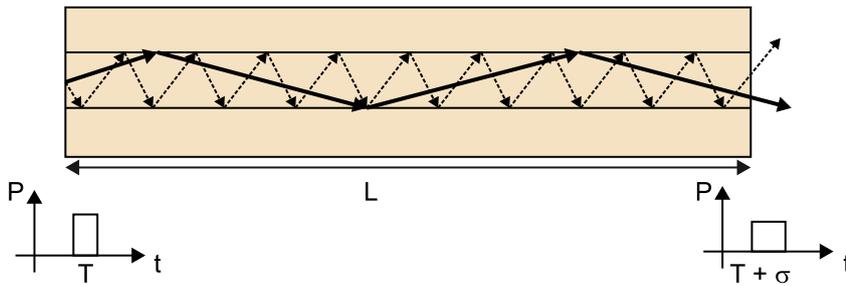


Figura 8. Dispersión modal

La principal consecuencia de este efecto en los sistemas de comunicaciones ópticas es que provoca un ensanchamiento temporal del bit (σ_t). El bit en la entrada de la fibra tiene una duración T y, en la salida, su duración es $T + \sigma_t$. Será necesario evaluar si el sistema que se diseña puede soportar este ensanchamiento del bit.

En el caso de una fibra multimodo de índice de salto (MMF-SI), el ensanchamiento será:

$$\sigma_t = \frac{L\Delta}{c_1} \quad (8)$$

En el caso de una fibra multimodo de índice gradual (MMF-GRIN), el ensanchamiento será:

$$\sigma_t = \frac{L\Delta^2}{2c_1} \quad (9)$$

**Lectura de las fórmulas
(8) y (9)**

$$c_1 = \frac{c_0}{n_1}$$

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

El otro tipo de dispersión, la intramodal o cromática, se produce del mismo modo. Esta dispersión afecta tanto a las fibras monomodo como a las fibras multimodo, pero en el caso de la fibra multimodo no se considera, puesto que es insignificante en comparación con la dispersión modal. Por lo tanto, calcularemos la dispersión cromática como efecto limitador de los sistemas de comunicaciones ópticas que usan fibra monomodo. La dispersión cromática está determinada por el material y por la guía, y la causa de que distintos componentes frecuenciales de la luz de la portadora óptica viajen a velocidades diferentes y, por lo tanto, lleguen en instantes de tiempo distintos, es que el índice de refracción no resulta constante con la longitud de onda. Recordemos que el índice de refracción relaciona la velocidad de la luz en el vacío con la velocidad de la luz en la guía. Así pues, al no tener una portadora monocromática, sino con un cierto ancho de banda ($\Delta\lambda$), sufriremos pequeñas variaciones del índice de refracción que se traducen en pequeñas variaciones de la velocidad y, por lo tanto, en un ensanchamiento del pulso de luz. Observad que cuanto mayor sea el ancho de banda de la portadora, más dispersión cromática sufriremos.

El ensanchamiento debido a la dispersión cromática se puede calcular a partir de la expresión siguiente.

$$\sigma_t = D \cdot \Delta\lambda \cdot L \quad (10)$$

El parámetro de dispersión (D) es un parámetro propio de la fibra y depende de la forma de la guía y del material con el que se ha fabricado. Este parámetro lo proporciona el fabricante de la fibra óptica, y lo suele hacer de dos maneras:

- Mediante una gráfica del parámetro de dispersión (D) respecto a la longitud de onda (λ).
- Mediante unos parámetros que se añaden a una función que interpola la gráfica de D respecto a λ .

En el caso de una fibra óptica monomodo de índice de salto estándar, el parámetro D se hace cero cerca de la segunda ventana. Como fruto de esto, en los enlaces a la segunda ventana no sufriremos dispersión cromática. Observemos que en el caso de la dispersión cromática, es posible conseguir eliminar la dispersión (cuando D vale cero), mientras que en la dispersión modal no podemos eliminarla: no podemos hacer cero L porque es la longitud del enlace y $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ solo vale cero si $n_1 = n_2$. Esto implica que el núcleo y el revestimiento sean iguales y, por lo tanto, no tengamos fibra óptica.

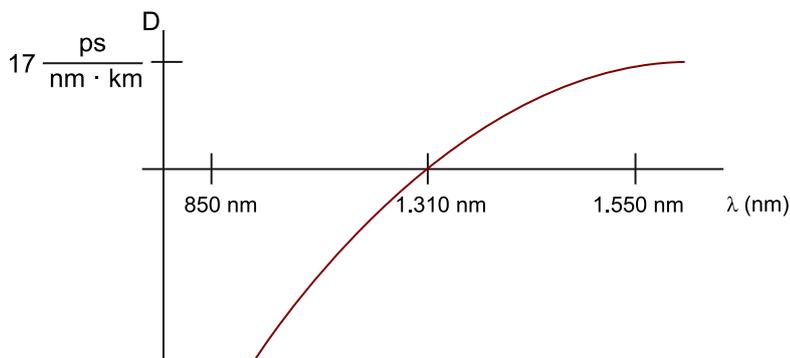


Figura 9. Parámetro de dispersión cromática de una fibra óptica estándar

Los parámetros que permiten interpolar la gráfica de D respecto a λ son el *slope* (S_0) y la longitud de onda de dispersión cero (λ_{ZD}). A partir de estos y de la función interpoladora, encontraremos el parámetro de dispersión (D) en la longitud de onda de trabajo.

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_{ZD}^4}{\lambda^3} \right] \quad (11)$$

Una vez conocemos los tipos de dispersión y los tipos de fibras a las que afecta, y sabemos calcular el ensanchamiento que tendremos, deberemos determinar si el enlace es válido o no lo es. Para saber si el ensanchamiento es aceptable, deberemos compararlo con el tiempo de bit o con la velocidad binaria. El criterio de diseño que se emplea discierne entre sistemas con formato *non return to zero* (NRZ) y sistemas con formato *return to zero* (RZ).

Lectura de la fórmula (10)

L : longitud del enlace.
 $\Delta\lambda$: ancho de banda de la señal inyectada en la fibra, expresado en longitud de onda.
 D : parámetro de dispersión.

- Para sistemas NRZ, se impone como limitación que el ensanchamiento del pulso no sea mayor que un cuarto del tiempo de bit. Por lo tanto,

$$\sigma_t < \frac{1}{4} T_b \quad (12)$$

- Para sistemas RZ, se impone como limitación que el ensanchamiento del pulso no sea mayor que la mitad del tiempo de bit. Por lo tanto,

$$\sigma_t < \frac{1}{2} T_b \quad (13)$$

3. Tipos de fibras ópticas

Al estudiar los tipos de fibras ópticas, se hace una primera clasificación entre la fibra monomodo (SMF) y la fibra multimodo (MMF).

Una fibra monomodo es la que propaga un solo modo, que se denomina modo fundamental de la fibra óptica. Una fibra multimodo es la que propaga varios modos. Al hacer el estudio del comportamiento de la fibra óptica empleando la óptica electromagnética, veremos que en realidad una fibra puede ser tanto monomodo como multimodo, puesto que el hecho de que propague uno o varios modos depende de parámetros físicos de la fibra (índices de refracción del núcleo y del revestimiento y radio del núcleo) y de la longitud de onda de trabajo. A unas longitudes de onda, la fibra se puede comportar como monomodo y a otras, como multimodo. Aunque haya esta dualidad, en general clasificaremos las fibras como monomodo o multimodo según si en la banda de interés propagan un modo o varios modos.

3.1. Fibra multimodo

Las fibras multimodo tienen un diámetro de núcleo bastante elevado, que está estandarizado en dos valores: 50 μm y 62,5 μm . El diámetro del revestimiento está estandarizado a 125 μm . De este modo, cuando nos referimos a una fibra MMF 50/125, estamos indicando que se trata de una fibra multimodo con un núcleo de 50 μm de diámetro y un revestimiento de 125 μm de diámetro.

Las fibras multimodo se clasifican en fibras multimodo de índice de salto (MMF-SI) y las de índice gradual (MMF-GRIN). Las fibras multimodo de índice de salto son aquellas en las que el núcleo está fabricado con un material homogéneo, es decir, el núcleo tiene un único material con solo un índice de refracción. El número de índice de salto proviene de la forma que tiene el perfil de índice de refracción de esta fibra óptica. Las fibras multimodo de índice gradual tienen un núcleo no homogéneo, y su perfil de índice de refracción del núcleo sigue una forma parabólica.

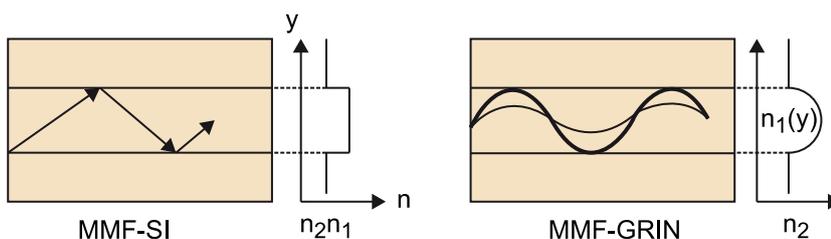


Figura 10. Tipos de fibras ópticas multimodo

Tal y como ya hemos comentado en el apartado anterior, las fibras multimodo sufren el fenómeno de la dispersión modal. La dispersión modal representa un factor de limitación tanto de la longitud como de la velocidad binaria del sistema de comunicaciones ópticas. Debido a la dispersión modal, las fibras multimodo se utilizan habitualmente para redes de área local, donde la distancia es corta y la velocidad de bit acostumbra a ser menor que en los enlaces troncales.

La fibra óptica multimodo de índice gradual nace con el objetivo de reducir la dispersión modal que sufre la fibra multimodo de índice de salto. En este tipo de fibra, el perfil del índice de refracción del núcleo no es constante. Normalmente sigue una forma parabólica, y el índice de refracción es mayor en el centro del núcleo de la fibra óptica que en los extremos. Al no ser un núcleo homogéneo, los rayos no viajan en línea recta sino que sufren una curvatura, a causa de la cual la propagación no es por reflexión total en la transición entre el núcleo y el revestimiento, sino que es de forma armónica, tal y como se ve en la figura anterior. Esta forma armónica de propagación se lleva a cabo con una cierta amplitud de la forma. En la figura se puede observar cómo el rayo de luz indicado con una línea discontinua tiene una amplitud mayor que el rayo indicado con una línea continua; por el hecho de tener más amplitud, recorrerá más longitud en el interior de la fibra y, por lo tanto, debería llegar más tarde que el otro rayo. Este efecto (dispersión modal) se minimiza al tener un perfil de índice de refracción con una forma parabólica. De este modo, el rayo con menos amplitud –y, por lo tanto, el que recorre menos longitud y viaja más cercano al centro del núcleo de la fibra óptica– verá un índice de refracción mayor, que provocará que la velocidad de propagación sea menor y se retrase. Al retrasarse este rayo respecto al que recorre más longitud, conseguimos que los rayos lleguen de manera simultánea al receptor y, de este modo, se reduce la dispersión modal.

3.2. Fibra monomodo

Como hemos visto, una fibra monomodo (SMF) es la que solo propaga un modo. La estructura básica de una fibra monomodo tiene un perfil de refracción de índice de salto y un diámetro de núcleo mucho menores que la de una fibra multimodo (entre 3 μm y 10 μm).

Este tipo de fibra, al propagar un solo modo, no sufre la dispersión modal, sino la dispersión cromática. Recordemos que el ensanchamiento provocado por la dispersión cromática depende de la distancia recorrida, del ancho de banda de la portadora inyectada en la fibra y del parámetro de dispersión (D). El parámetro de dispersión se hace cero en torno a la segunda ventana y, por lo tanto, en esta zona no sufriremos ensanchamiento debido a la dispersión cromática. La fibra óptica monomodo estándar tiene un parámetro D en la tercera ventana de entre 16 y 18 $\frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$.

La fibra monomodo se utiliza con frecuencia en los enlaces a larga distancia y de gran capacidad. Al implementar este tipo de enlaces, normalmente se utiliza la tercera ventana. Esta ventana disfruta de una atenuación baja –factor clave para llevar a cabo un enlace a larga distancia– y además, en esta banda hay amplificadores que trabajan directamente en dominio óptico y que pueden compensar las pérdidas que sufrimos. El principal efecto limitador de la distancia y de la velocidad pasa a ser la dispersión cromática. Hay varias estrategias para solucionar este problema, como por ejemplo utilizar compensadores de la dispersión cromática o emplear fibras que modifican su perfil de índice de refracción para desplazar la gráfica del parámetro de dispersión (D) hacia la tercera ventana y así conseguir un cero de dispersión o casi un cero de dispersión.

La fibra de dispersión desplazada (SMF-SDF) es una fibra con el cero de dispersión en la tercera ventana (en torno a 1.540 nm). El valor del parámetro de dispersión se sitúa entre -2 y $+2 \frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$. Este tipo de fibra no se utiliza hoy día, puesto que se trata de una fibra muy susceptible a sufrir no linealidades.

La fibra *non zero dispersion fiber* (NZDF) tiene el cero de dispersión desplazado hacia la zona de la tercera ventana, pero en la banda de trabajo de la tercera ventana el parámetro de dispersión (D) se sitúa entre $2,6$ y $6 \frac{\text{ps}}{\text{nm}\cdot\text{km}}$. Esto hace que tengamos una fibra con una dispersión cromática menor que en la fibra monomodo estándar y con un comportamiento frente a las no linealidades mejor que el de una fibra de dispersión desplazada.

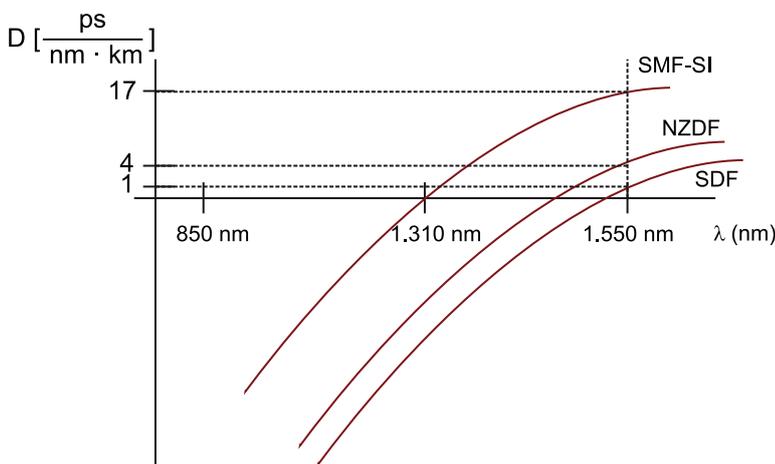


Figura 11. Otros tipos de fibra óptica monomodo

3.3. Normativas sobre fibra óptica

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) define una serie de normas que caracterizan los diferentes tipos de fibra óptica que hemos visto en este apartado. A continuación, citamos solo las más importantes.

- G.651: fibra multimodo 50/125 μm .

- G.652: fibra monomodo de índice de salto (SMF-SI). Se trata de la fibra monomodo estándar, caracterizada por tener el cero de dispersión en la segunda ventana.
- G.653: fibra de dispersión desplazada (SMF-SDF). Fibra monomodo con el cero de dispersión en la tercera ventana.
- G.655: fibra *non zero dispersion fiber* (NZDF).

4. Propagación de la luz por la fibra óptica. Análisis desde el punto de vista de la óptica electromagnética

4.1. Óptica electromagnética

La luz es una onda electromagnética y, por lo tanto, tiene un componente de campo eléctrico y un componente de campo magnético. Se rige mediante las ecuaciones de Maxwell.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (14)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (15)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (16)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (17)$$

A partir de las ecuaciones de Maxwell, podemos deducir la ecuación de onda. La ecuación de onda nos describe cómo se propaga la luz (la onda electromagnética) en el espacio libre.

$$\nabla^2 \vec{E} + \frac{\omega^2 \cdot n^2(\omega) \cdot \vec{E}}{c_0^2} = 0 \quad (18)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \frac{\omega^2 \cdot n^2(\omega) \cdot \vec{H}}{c_0^2} = 0 \quad (19)$$

La ecuación de onda es en realidad dos, una para el campo eléctrico y otra para el campo magnético. Si resolvemos estas ecuaciones con unas determinadas condiciones de contorno que vienen definidas por la guía de onda, conseguiremos conocer cómo se propaga la luz por la fibra óptica y, por lo tanto, encontraremos cómo se propagan los modos dentro de una fibra. Un modo es una solución específica de la ecuación de onda que satisface unas condiciones de contorno apropiadas. Hay que tener en cuenta que *modo* es un concepto genérico: nos podemos referir a un modo de propagación de la fibra, a un modo de un láser, al de un resonador, etc. En este caso, nos referimos a los modos de propagación de la guía de onda (fibra óptica).

Al resolver la ecuación de onda en la fibra óptica, podemos observar que esta guía sigue una simetría cilíndrica. De esta manera, será conveniente resolver la ecuación de onda en coordenadas cilíndricas. A partir de la resolución de la ecuación de onda en la fibra óptica, obtendremos dos informaciones fundamentales: la distribución de campo dentro de la fibra óptica (con todos los componentes espaciales del campo eléctrico y del campo magnético) y la ecuación general de propagación de la luz por la fibra óptica.

4.2. La ecuación general de propagación de la luz por la fibra óptica

La ecuación que nos describe cómo se propaga la luz por la fibra óptica desde el punto de vista de la óptica electromagnética es la ecuación general de propagación de la luz por la fibra óptica.

$$\left(\frac{J_m'(k \cdot a)}{k \cdot J_m(k \cdot a)} + \frac{k_m'(\gamma \cdot a)}{\gamma \cdot K_m(\gamma \cdot a)} \right) \cdot \left(\frac{J_m(k \cdot a)}{k \cdot J_m(k \cdot a)} + \frac{n_2^2 \cdot K_m'(\gamma \cdot a)}{n_1^2 \cdot \gamma \cdot K_m(\gamma \cdot a)} \right) = \left(\frac{m \cdot \beta}{n_1 \cdot a \cdot k_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{k^2} + \frac{1}{\gamma^2} \right) \quad (20)$$

Lectura de la fórmula (20)

n_1 : índice de refracción del núcleo.

n_2 : índice de refracción del revestimiento.

J_m : función de Bessel de primera especie.

K_m : función de Bessel de segunda especie modificada.

m : orden de la función de Bessel.

a : radio del núcleo de la fibra óptica.

k_0 : número de onda.

β : constante de propagación.

$$k^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2$$

En esta ecuación tenemos como variables el índice de refracción del núcleo, del revestimiento, el número de onda k_0 (donde $k_0 = 2\pi/\lambda$) y el radio; estas variables las fijamos nosotros, puesto que son parámetros físicos o la frecuencia de trabajo. La variable que encontraremos al resolver la ecuación es la β , que corresponde a la constante de propagación.

La solución a la ecuación general de propagación muchas veces no se puede hacer de manera analítica y se tiene que recurrir a métodos de cálculo numérico para encontrarla. La solución de β no es única. Además de ser una ecuación con múltiples soluciones, estas serán distintas dependiendo de cuál sea el orden utilizado en las funciones de Bessel.

Referencia bibliográfica

P. Govind Agrawal (2010). *Fiber-Optic Communication Systems*. Wiley.

Las diferentes soluciones de la ecuación se representan de manera gráfica utilizando los parámetros de frecuencia normalizada (eje horizontal) y la constante de propagación normalizada (eje vertical).

4.3. Solución gráfica a la ecuación general de propagación de la luz por la fibra óptica

La gráfica siguiente nos muestra las soluciones de la ecuación general de propagación de la luz en la fibra óptica. De este gráfico, se pueden extraer las soluciones normalizadas que corresponden a los diferentes modos de propagación de la luz dentro de la fibra óptica.

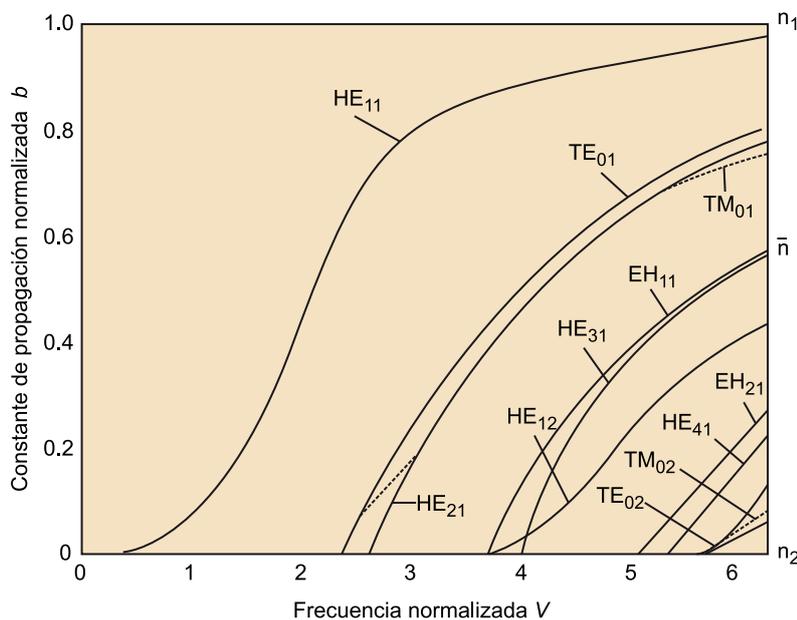


Figura 12. Gráfica b-V de una fibra óptica de índice de salto

La gráfica que representa los modos de propagación nos da gran cantidad de información que, además, es válida para cualquier fibra óptica de índice de salto, puesto que la solución gráfica está normalizada.

Las soluciones se representan en la gráfica como curvas. Cada una representa un modo de propagación, cuyo nombre se indica junto a cada curva. Para determinar la nomenclatura de cada modo, se utilizan las letras H (campo magnético) y E (campo eléctrico). El orden (EH o HE) indica qué componente es el predominante. Se le añade un subíndice de dos dígitos: el primer dígito indica el orden de la función de Bessel empleado al resolver la ecuación y el segundo es un valor numérico que indica el orden de las soluciones de la ecuación ordenadas de pequeñas a grandes. Hay unos casos especiales, denominados modos transversales, que son soluciones a la función de Bessel de orden cero y se indican con las letras TE y TM (por ejemplo, TE₀₁ y TM₀₁).

Para una fibra óptica en particular, se puede calcular su frecuencia normalizada (V) a partir de la longitud de onda de trabajo, los índices de refracción y el radio del núcleo.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (21)$$

A partir de la V y sobre la solución gráfica, podemos encontrar los diferentes modos que se propagarán por la fibra en la situación descrita. Hay que decir que los modos propagados son todos ortogonales entre sí, de modo que no se afectan unos a otros. Si observamos la gráfica, vemos que hay un modo que siempre se propagará. Este modo es el HE_{11} y se denomina modo fundamental (es el único modo que se propaga en las fibras monomodo).

Si nos centramos en el eje vertical, que corresponde a la constante de propagación normalizada (b), puede tomar valores comprendidos entre 0 y 1. A partir de la constante de propagación normalizada, podemos encontrar el índice de refracción efectivo (\bar{n}), que es el índice que ve el modo al propagarse. El valor de este índice dependerá de la distribución de campo del modo. Puesto que los diferentes modos tienen una distribución por la que la luz viaja una parte por el núcleo y otra parte por el revestimiento de la fibra, tomará un valor $n_1 > \bar{n} > n_2$. La expresión que relaciona la constante de propagación normalizada con el índice de refracción efectivo es:

$$b = \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2} \quad (22)$$

A partir del índice de refracción efectivo, se puede encontrar para una determinada longitud de onda la constante de propagación β (se define el índice de refracción efectivo como la relación entre la constante de propagación y el número de onda):

$$\beta = \bar{n} \cdot k_0 = \bar{n} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \quad (23)$$

El valor del índice de refracción efectivo nos aporta información sobre si la luz se propaga con un campo distribuido de manera mayoritaria por el núcleo o por el revestimiento, en función de si este valor es más cercano al índice de refracción del núcleo o más cercano al índice de refracción del revestimiento. Del mismo modo, al ser parámetros dependientes entre sí, la constante de propagación normalizada también nos aporta esta información, además de la velocidad del modo.

Observad la fórmula de la constante de propagación normalizada. El hecho de que el índice efectivo tome un valor entre n_1 y n_2 significará que la constante de propagación normalizada tendrá un valor entre 0 y 1. Si b es cercana a 1, entonces la luz se propaga de manera mayoritaria por el núcleo, y $\bar{n} \cong n_1$, y

el modo se propagará más lentamente (índice de refracción alto puesto que $n_1 > n_2$). En cambio, si b es cercana a 0, la luz se propaga mayoritariamente por el revestimiento de la fibra, $\bar{n} \cong n_2$ y el modo viajará más rápido.

Evaluamos los extremos de b , es decir $b = 1$ y $b = 0$. Si nos fijamos en las diferentes soluciones (curvas en la gráfica $b-v$), nos damos cuenta de que son asíntóticas en $b = 1$ y, por lo tanto, la luz no se puede propagar solo por el núcleo de la fibra óptica. Si $b = 0$, quiere decir que el índice efectivo vale n_2 (en este caso, estamos en la parte inferior de la gráfica). La luz tendría que propagarse solo por el revestimiento, pero en realidad la luz no se propaga bajo esta condición porque cuando el índice efectivo es n_2 (el índice en el revestimiento), el modo está cortado. Se trata de lo que se conoce como condición de corte de un modo.

Por lo tanto, el índice efectivo nunca llega a ser ni n_1 ni n_2 . En consecuencia, la luz no se puede propagar solo por el núcleo de una fibra óptica ni solo por el revestimiento de una fibra óptica. La luz viaja una parte por el núcleo y una parte por el revestimiento. Observemos que no es lo mismo que vimos al estudiar cómo se propaga la luz dentro de la fibra óptica empleando la óptica de rayos. Recordemos que bajo la consideración de la óptica de rayos, la propagación se basa en la propiedad de la reflexión total, que se produce en la transición entre núcleo y revestimiento. Por lo tanto, toda la luz tendría que viajar dentro del núcleo de la fibra y no debería haber luz en el revestimiento. Empleando la óptica electromagnética, nos damos cuenta de que la propagación no es así y que la óptica de rayos nos proporciona una visión parcial de lo que ocurre.

En el eje horizontal de la gráfica, se representa la frecuencia normalizada (V). Este parámetro puede tener un valor entre cero e infinito. Observemos que para una determinada frecuencia normalizada, si trazamos una línea vertical sobre la gráfica, cortaremos más de un modo (curvas). Los modos que cortamos con la línea son los modos que se propagarán por la fibra óptica.

Desde una frecuencia normalizada de $V = 0$ hasta $V = 2.405$, se propaga un solo modo. Este es el margen de frecuencias (o región) en el que la fibra óptica se comporta como una fibra monomodo (solo se propaga el modo HE_{11}). A partir de $V = 2.405$ también se excita el modo TE_{01} y TM_{01} , y a medida que aumentamos la frecuencia normalizada V vamos añadiendo nuevos modos. Esta región se conoce como región multimodo, y la fibra se comporta como una fibra óptica multimodo.

El hecho de que una fibra se comporte como monomodo o multimodo solo depende de los parámetros a , n_1 y n_2 y de la longitud de onda de trabajo. Por lo tanto, si tenemos fijados los parámetros físicos, una misma fibra a una determinada longitud de onda puede tener una propagación multimodo y

otra longitud, una propagación monomodo. Se define la frecuencia de corte o longitud de onda de corte de la fibra óptica como la frecuencia o longitud de onda en la que la fibra pasa de la región monomodo a la región multimodo.

Cuando se propaga más de un modo en una fibra, se produce el fenómeno de la dispersión modal o intermodal. Para una determinada frecuencia normalizada y para un modo determinado, podemos obtener el valor de la constante de propagación normalizada a partir de calcular el índice de refracción efectivo y, con el mismo, calcular la velocidad de propagación de la luz del modo en cuestión. Si tenemos más de un modo, podemos hacer los cálculos anteriores para cada uno de los modos, y veremos que tendremos diferentes velocidades de propagación de la luz dentro de la fibra óptica. Estas diferentes velocidades hacen que la señal llegue dispersa en el tiempo al receptor, lo que provoca el fenómeno de la dispersión modal. Conociendo las velocidades del modo que se propaga más rápido y el modo que se propaga más lento, podemos encontrar la dispersión modal de una fibra para una determinada frecuencia.

La frecuencia normalizada de una portadora de luz es un valor que se relaciona con la frecuencia central de la portadora, pero hay que decir que siempre tendremos un pequeño ancho de banda en torno a esta. Este pequeño ancho de banda provoca que tengamos diferentes velocidades de propagación para un mismo modo (esto corresponde a la dispersión cromática provocada por la guía). En la gráfica, se puede observar que la dispersión cromática tiene unos valores muy inferiores a la modal.

4.4. Ejemplos sobre propagación de señales por la fibra óptica

En este apartado, veremos diferentes ejemplos que nos permitirán consolidar los conocimientos vistos en la parte teórica.

4.4.1. Ejemplo I

En un enlace de comunicaciones ópticas, observamos en el receptor que cada bit ocupa 1,2 microsegundos. ¿Cuál es la apertura numérica de la fibra óptica empleada?

Datos: la fibra óptica es multimodo de índice de salto. El formato de los datos es OOK (*on off keying*) RZ a 1 Mb/s. La longitud del enlace es de 10 km. El índice de refracción del revestimiento es de 1,45.

En el enunciado, nos dicen que la velocidad binaria es de 1 Mb/s. Por lo tanto, el tiempo de bit será de un microsegundo.

Si el tiempo de bit en el emisor es de un microsegundo y en el receptor es de 1,2 microsegundos, el ensanchamiento provocado por la dispersión modal (se trata de una fibra multimodo de índice de salto) es de 0,2 microsegundos.

A partir de la expresión del ensanchamiento, podemos encontrar el índice de refracción del núcleo.

$$\sigma_t = \frac{L \cdot \Delta}{c_1} = \left\{ \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \right\} = \frac{L \cdot (n_1 - n_2)}{n_1 \cdot c_1} = \left\{ c_1 = \frac{c_0}{n_1} \right\} = \frac{L \cdot (n_1 - n_2)}{c_0} \quad (24)$$

$$n_1 = \frac{\sigma_t \cdot c_0}{L} + n_2 = 1,456 \quad (25)$$

Con el índice de refracción del núcleo y del revestimiento, ya podemos calcular la apertura numérica. Finalmente:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 0,132 \quad (26)$$

4.4.2. Ejemplo II

Suponed un enlace de 1.500 km de longitud. Este enlace multiplexa una portadora IM/DD RZ 2,5 Gbit/s en la segunda ventana, y otra portadora IM/DD RZ 2,5 Gbit/s en la tercera ventana. En las dos ventanas, se envía de manera simultánea la misma información. Indicad cuál es la diferencia temporal en el receptor entre el símbolo que se envía a la segunda ventana y el símbolo que se envía a la tercera ventana. La fibra óptica tiene un diámetro de núcleo de 5 micrómetros, un índice de refracción del núcleo de 1,46 y un índice de refracción del revestimiento de 1,45.

Calculamos la frecuencia normalizada en la segunda y en la tercera ventana.

$$V(1.310 \text{ nm}) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 2,0454 \quad (27)$$

$$V(1.550 \text{ nm}) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 1,728 \quad (28)$$

En las dos ventanas la frecuencia normalizada es superior a 2,405 y, por lo tanto, se comporta como una fibra monomodo, de manera que solo propaga el modo fundamental.

A partir de la solución gráfica en la ecuación general de propagación para una fibra óptica, podemos encontrar la constante de propagación normalizada en la segunda y en la tercera ventana.

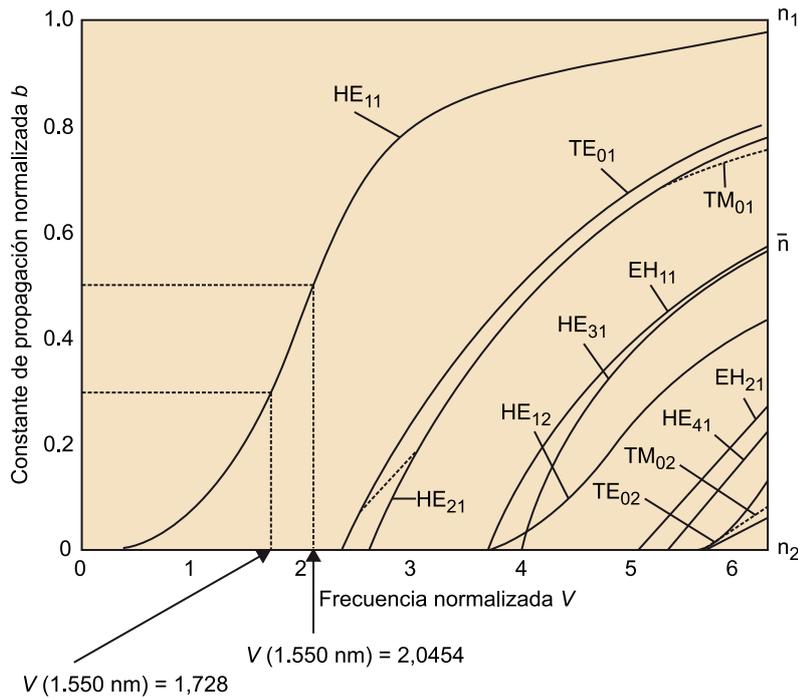


Figura 13. Búsqueda de las constantes de propagación normalizadas

$$b(1.310 \text{ nm}) \approx 0,5 \quad (29)$$

$$b(1.550 \text{ nm}) \approx 0,28 \quad (30)$$

A partir de las constantes de propagación normalizadas, encontramos el índice de refracción efectivo de la segunda y la tercera ventana:

$$b = \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2} \quad (31)$$

$$\bar{n}(1.310 \text{ nm}) = 1,455 \quad (32)$$

$$\bar{n}(1.550 \text{ nm}) = 1,4528 \quad (33)$$

Si relacionamos el índice efectivo con la velocidad, la longitud y el tiempo, encontramos lo que se tarda en recorrer los 1.500 kilómetros tanto en la segunda como en la tercera ventana y finalmente, restando estos dos valores, se obtiene la diferencia temporal entre el símbolo transmitido en la segunda ventana y el transmitido en la tercera.

$$T = \frac{L \cdot \bar{n}}{c_0} \quad (34)$$

$$T(1.310 \text{ nm}) = 0,007264 \text{ s} \quad (35)$$

$$T(1.550 \text{ nm}) = 0,007275 \text{ s} \quad (36)$$

$$\Delta T = 11 \mu\text{s} \quad (37)$$

4.4.3. Ejemplo III

Queremos diseñar un enlace por fibra óptica entre dos ciudades separadas 20 km. El índice de refracción del revestimiento de la fibra óptica es 1,45 y $\Delta = 0,005$. El núcleo de la fibra tiene un diámetro de 8 micrómetros.

a) ¿Cuál será el ensanchamiento provocado por la dispersión en la segunda ventana?

b) Deducid la expresión de la dispersión modal para un número elevado de modos.

A partir del índice de refracción del revestimiento (n_2) y de Δ , encontramos el índice de refracción del núcleo (n_1):

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{n_1 - 1,45}{n_1} = 0,005 \quad (38)$$

$$n_1 = 1,4573 \quad (39)$$

Una vez conocemos el índice de refracción del núcleo, ya podemos calcular la frecuencia normalizada a 1.310 nm:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (40)$$

$$V(1.310 \text{ nm}) = \frac{2\pi}{1,31 \mu\text{m}} 4 \mu\text{m} \sqrt{1,4573^2 - 1,45^2} = 2,795 \cong 2,8 \quad (41)$$

De la solución gráfica a la ecuación general de propagación por una fibra óptica, podemos encontrar los modos que se propagan y la constante de propagación normalizada de cada uno de los mismos. Nos interesará el modo que se propaga más rápido y el modo que se propaga más lento, para encontrar así la dispersión modal.

Nota

Si la fibra es multimodo, calculad la dispersión modal (diferencia temporal entre el modo que se propaga más rápido y el modo que se propaga más lento). Si no se propagan más de 20 modos, no utilizéis la aproximación de la dispersión modal para un número elevado de modos.

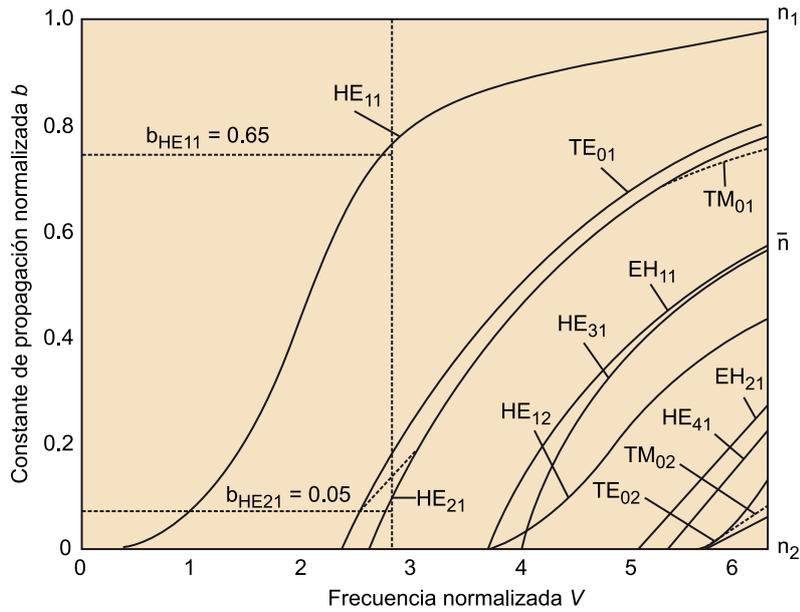


Figura 14. Búsqueda de las constantes de propagación normalizadas

Definimos b_{HE11} como la constante de propagación normalizada asociada al modo HE_{11} (el modo lento, puesto que su índice de refracción será más alto), y b_{HE21} como la constante de propagación normalizada asociada al modo HE_{21} (el modo rápido, puesto que su índice de refracción será más bajo). Obtenemos $b_{HE11} = 0,65$ y $b_{HE21} = 0,05$ a partir de las gráficas.

A partir de estos valores, podemos encontrar los índices de cada uno de estos modos:

$$b = \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2} \quad (42)$$

El índice de refracción efectivo valdrá:

$$\bar{n} = b(n_1 - n_2) + n_2 \quad (43)$$

Si sustituimos:

$$\bar{n}_{HE11} = 1,454745 \quad (44)$$

$$\bar{n}_{HE21} = 1,450584 \quad (45)$$

Si conocemos el índice de refracción efectivo de cada modo, podemos saber la velocidad de cada uno ($\bar{n} = \frac{c_0}{c}$) y, por lo tanto, el tiempo que tarda cada modo en recorrer una longitud L de fibra.

$$T_{HE11} = \frac{L}{c_{HE11}} = \frac{L}{c_0 \bar{n}_{HE11}} \quad (46)$$

$$T_{\text{HE21}} = \frac{L}{c_{\text{HE21}}} = \frac{L}{c_0 \bar{n}_{\text{HE21}}} \quad (47)$$

Si sabemos que la dispersión modal es la diferencia temporal entre el modo que se propaga más rápido y el modo que se propaga más lento, entonces:

$$\sigma_t = T_{\text{HE11}} - T_{\text{HE21}} = \frac{L}{c_0} (\bar{n}_{\text{HE11}} - \bar{n}_{\text{HE21}}) = 277,4 \text{ ns} \quad (48)$$

Observemos que la ecuación anterior nos relaciona el tiempo entre modos y que este está relacionado con los índices de refracción. En una situación en la que se propaga un número elevado de modos, tendremos una frecuencia normalizada elevada y puesto que el modo HE_{11} es asintótico ($b=1$), esto resulta en una constante de propagación normalizada cercana a la unidad. Por lo tanto, se trata de un modo que tiene un índice de refracción efectivo similar al índice de refracción del núcleo $\bar{n}_H \cong n_1$. Por otro lado, al tener un número elevado de modos es muy probable que a la frecuencia normalizada en la que nos encontramos esté arrancando algún modo, lo que implica que haya luz que se propaga con un índice de refracción efectivo similar al índice de refracción del revestimiento $\bar{n}_L \cong n_2$. Entonces:

$$\sigma_t = T_H - T_L = \frac{L}{c_0} (\bar{n}_H - \bar{n}_L) \cong \frac{L}{c_0} (n_1 - n_2) = \frac{L}{c_0} \cdot n_1 \cdot \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = \frac{L}{c_1} \cdot \Delta \quad (49)$$

4.4.4. Ejemplo IV

Queremos diseñar un enlace por fibra óptica entre dos ciudades. El índice de refracción del revestimiento de la fibra óptica de índice de salto es 1,45 y $\Delta = 0,005$. El núcleo de la fibra tiene un diámetro de 9,5 micrómetros. El emisor utilizado tiene una longitud de onda central de 1.550 nm y un ancho de banda de 20 nm.

¿Qué porcentaje representa la dispersión cromática (de la guía) introducida por el modo fundamental sobre la dispersión modal?

Explicad el procedimiento empleado y justificad la respuesta.

A partir del índice de refracción del revestimiento (n_2) y de Δ , encontramos el índice de refracción del núcleo (n_1):

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{n_1 - 1,45}{n_1} = 0,005 \quad (50)$$

$$n_1 = 1,4573 \quad (51)$$

Una vez conocemos el índice de refracción del núcleo, ya podemos calcular la frecuencia normalizada a 1.550 nm:

Nota

El fabricante no nos proporciona el parámetro de dispersión D .

Tened en cuenta que la constante de propagación normalizada del modo fundamental se puede relacionar con la frecuencia normalizada mediante la aproximación:

$$b(V) \cong \left(1,1428 - \frac{0,9960}{V} \right)$$

Si no se propagan más de 20 modos, no utilizéis la aproximación de la dispersión modal para un número elevado de modos.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (52)$$

$$V(1.550 \text{ nm}) = \frac{2\pi}{1,55 \text{ }\mu\text{m}} 4,75 \text{ }\mu\text{m} \sqrt{1,4573^2 - 1,45^2} = 2,802484 \quad (53)$$

A partir de la solución gráfica de la ecuación general de propagación por una fibra óptica, podemos encontrar los modos que se propagan y la constante de propagación normalizada de cada uno de los mismos. Nos interesará el modo en que se propaga más rápido y el modo en que se propaga más lento, para de este modo encontrar la dispersión modal.

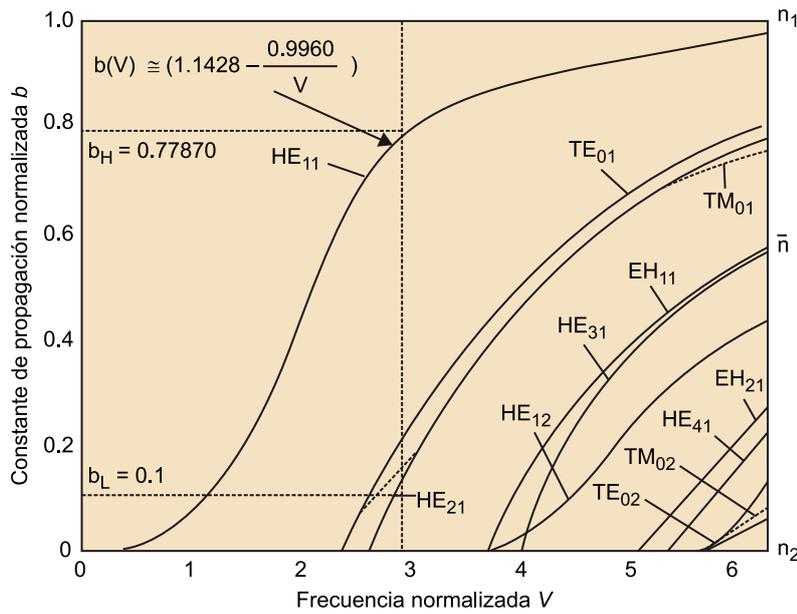


Figura 15. Búsqueda de las constantes de propagación normalizadas

Definimos b_H como la constante de propagación normalizada asociada al modo HE_{11} (el modo lento), y b_L como la constante de propagación normalizada asociada al modo HE_{21} (el modo rápido). Obtenemos b_H con la ecuación que nos proporciona el enunciado, y b_L a partir de las gráficas.

$$b_H \cong \left(1,1428 - \frac{0,9960}{2,8024} \right) = 0,7870 \quad (54)$$

$$b_L = 0,1 \quad (55)$$

Hay que notar que cada constante de propagación normalizada está asociada a un índice de refracción efectivo. Así pues, la diferencia entre constantes de propagación normalizadas supondrá una diferencia de índices de refracción efectivos que implicarán una diferencia de velocidades y, por lo tanto, una diferencia temporal que indica que sufrimos una dispersión entre los modos (intermodal) o modal.

Se nos pide la relación (en porcentaje) entre la dispersión cromática introducida por el modo fundamental y la dispersión modal. Para encontrar la dispersión cromática, será necesario evaluar la diferencia temporal que se produce en el margen frecuencial que ocupa la luz que excita el modo HE_{11} . Un determinado ancho de banda de la luz sufrirá un determinado margen de índice de refracción. Este dependerá de la distribución de la luz en la fibra óptica, puesto que se trata de un índice de refracción efectivo.

Buscaremos cuál es el margen de frecuencia normalizada que tenemos según el ancho de banda de la luz (20 nm) y el margen correspondiente de constante de propagación normalizada del modo fundamental (HE_{11}).

En la figura siguiente, podemos observar los márgenes que hemos comentado.

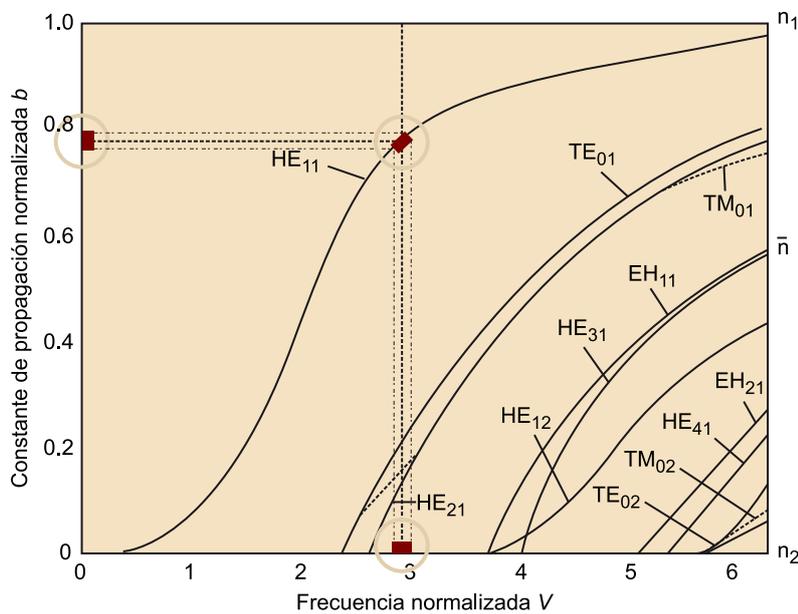


Figura 16. Variación de la constante de propagación normalizada

Calculamos las frecuencias normalizadas:

$$V(1.540 \text{ nm}) = \frac{2\pi}{1,54 \mu\text{m}} 4,75 \mu\text{m} \sqrt{1,4573^2 - 1,45^2} = 2,8206 \quad (56)$$

$$V(1.560 \text{ nm}) = \frac{2\pi}{1,56 \mu\text{m}} 4,75 \mu\text{m} \sqrt{1,4573^2 - 1,45^2} = 2,7845 \quad (57)$$

Para calcular las constantes de propagación normalizadas, empleamos la ecuación que se nos proporciona.

$$b_H \cong \left(1,1428 - \frac{0,9960}{2,8206}\right) = 0,78968 \quad (58)$$

$$b_L \cong \left(1,1428 - \frac{0,9960}{2,7845}\right) = 0,7851 \quad (59)$$

La relación (en porcentaje) entre la dispersión cromática introducida por el modo fundamental y la dispersión modal será:

$$\frac{\sigma_{tCr}}{\sigma_{tMd}} \cdot 100 = \frac{(b_H - b_L)_{Cr}}{(b_H - b_L)_{Md}} \cdot 100 \quad (60)$$

Ahora lo demostraremos. Partimos de la expresión que nos determina la diferencia temporal entre la luz que viaja con un índice \bar{n}_H y la luz que viaja con un índice \bar{n}_L :

$$\sigma_t = \frac{L(\bar{n}_H - \bar{n}_L)}{c_0} \quad (61)$$

Encontramos la diferencia $\bar{n}_H - \bar{n}_L$. Recordemos que:

$$b = \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2} \quad (62)$$

El índice de refracción efectivo valdrá:

$$b(n_1 - n_2) + n_2 = \bar{n} \quad (63)$$

Si restamos los dos índices de refracción efectivos:

$$\bar{n}_H - \bar{n}_L = (n_1 - n_2)b_H + n_2 - (n_1 - n_2)b_L - n_2 = (b_H - b_L)(n_1 - n_2) \quad (64)$$

Por lo tanto,

$$\sigma_t = \frac{L(\bar{n}_H - \bar{n}_L)}{c_0} = \frac{L(b_H - b_L)(n_1 - n_2)}{c_0} \quad (65)$$

Finalmente,

$$\frac{\sigma_{tCr}}{\sigma_{tMd}} \cdot 100 = \frac{\frac{L(b_H - b_L)_{Cr}(n_1 - n_2)}{c_0}}{\frac{L(b_H - b_L)_{Md}(n_1 - n_2)}{c_0}} \cdot 100 = \frac{(b_H - b_L)_{Cr}}{(b_H - b_L)_{Md}} \cdot 100 \quad (66)$$

Una vez demostrada la expresión de la relación entre dispersiones que nos piden, solo hay que sustituir:

$$\frac{\sigma_{tCr}}{\sigma_{tMd}} \cdot 100 = \frac{(b_H - b_L)_{Cr}}{(b_H - b_L)_{Md}} \cdot 100 = \frac{0,004578}{0,6870} \cdot 100 = 0,663 \% \quad (67)$$

4.4.5. Ejemplo V

Disponemos de un enlace punto a punto de comunicaciones ópticas de longitud exacta desconocida, pero que se sitúa entre 60 y 100 km, que opera en la tercera ventana y que emplea una fibra con un diámetro de núcleo de 5,5 micrómetros, índice de refracción del núcleo de 1,48 e índice de refracción del revestimiento de 1,47.

Para averiguar la longitud exacta de este enlace, hemos ideado un sistema basado en el fenómeno de la dispersión modal. Para esto, inyectamos un tren de pulsos en la fibra con una fuente sintonizable que permite operar en el margen de 825 nm a 1.150 nm. En el receptor, situamos un osciloscopio y medimos el ensanchamiento que han sufrido los pulsos.

a) Si queremos hacer la medida de la distancia en la primera ventana, determinad la relación que tendremos entre el ensanchamiento del pulso y la longitud del enlace.

b) Determinad la longitud de onda de emisión de la fuente sintonizable que nos proporcionará más precisión en la medida. En esta nueva situación, determinad la relación que tendremos entre el ensanchamiento del pulso y la longitud del enlace.

c) Indicad la principal razón por la que este sistema de medida no funcionaría.

a) Antes que nada, se debería comprobar si la fibra óptica empleada se comporta como una fibra multimodo en primera ventana. Para esto, calcularemos la longitud de onda de corte:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (68)$$

La longitud de onda de corte será aquella que hace que la frecuencia normalizada valga 2,405. Entonces:

$$\lambda = \frac{2\pi}{2,405} \cdot 2,75 \mu\text{m} \cdot \sqrt{1,48^2 - 1,47^2} = 1,234 \mu\text{m} \quad (69)$$

Fruto del resultado, observamos que la longitud de onda de corte se sitúa a una longitud de onda superior en la primera ventana. Por lo tanto, podemos asegurar que el sistema es multimodo en la primera ventana.

A continuación, buscaremos la frecuencia normalizada en la longitud de onda donde se lleva a cabo la medida (primera ventana).

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{0,85 \mu\text{m}} \cdot 2,75 \mu\text{m} \cdot \sqrt{1,48^2 - 1,47^2} = 3,49 \quad (70)$$

A partir de la gráfica b - V , encontramos las constantes de propagación normalizadas (b) de los diferentes modos que se propagan a la frecuencia normalizada que corresponde a la primera ventana. Nos centramos en las constantes de propagación normalizadas del modo que viaja más rápido (HE_{21}) y del modo que viaja más lento (HE_{11}).

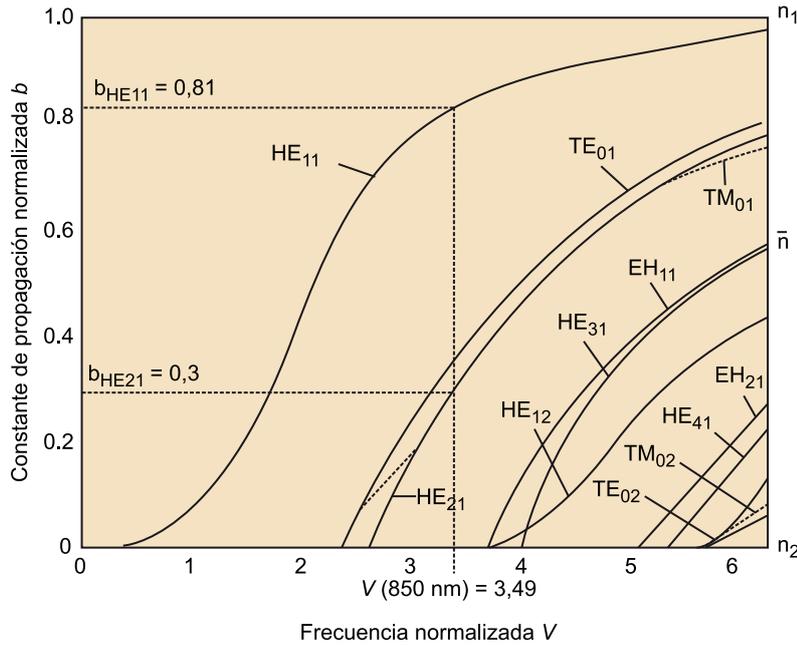


Figura 17. Búsqueda de las constantes de propagación normalizadas

A partir de estas dos frecuencias normalizadas ($b_{\text{HE}_{21}}$ y $b_{\text{HE}_{11}}$), podemos encontrar el índice de refracción efectivo del modo que viaja más rápido ($n_{\text{HE}_{21}}$) y del modo que viaja más lento ($n_{\text{HE}_{11}}$).

$$b = \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2} \quad (71)$$

Entonces,

$$\bar{n} = b(n_1 - n_2) + n_2 \quad (72)$$

$$n_{\text{HE}_{11}} = 0,81 \cdot (1,48 - 1,47) + 1,47 = 1,4781 \quad (73)$$

$$n_{\text{HE}_{21}} = 0,3 \cdot (1,48 - 1,47) + 1,47 = 1,473 \quad (74)$$

Finalmente, el ensanchamiento del pulso corresponde a la diferencia temporal entre el modo que viaja más rápido y el modo que viaja más lento. Por lo tanto:

$$\sigma_t = \frac{L}{c_0} |n_{\text{HE21}} - n_{\text{HE11}}| \quad (75)$$

Si sustituimos:

$$\frac{\sigma_t}{L} = \frac{0,0051}{c_0} \quad (76)$$

b) Este sistema de medida de longitud de fibra se basa en el fenómeno de la dispersión modal. Por lo tanto, cuanto más ensanchamiento del pulso consigamos, más precisión tendremos. Para conseguir un ensanchamiento elevado será necesario tener más diferencia temporal (así pues, también más diferencia de velocidad y, de rebote, más diferencia de índice de refracción y de constante de propagación normalizada) entre el modo que viaja más rápido y el modo que viaja más lento. La situación ideal para maximizar la precisión sería que el modo más rápido tuviese un índice de refracción cercano a n_2 y que el modo más lento tuviera un índice de refracción cercano a n_1 .

El margen de funcionamiento de la fuente sintonizable en longitud de onda (de 825 nm a 1.150 nm) nos dará también un margen de frecuencias normalizadas de funcionamiento.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{0,825 \mu\text{m}} \cdot 2,75 \mu\text{m} \cdot \sqrt{1,48^2 - 1,47^2} = 3,59 \quad (77)$$

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{1,15 \mu\text{m}} \cdot 2,75 \mu\text{m} \cdot \sqrt{1,48^2 - 1,47^2} = 2,58 \quad (78)$$

Si observamos la gráfica b-V, en el margen de frecuencia normalizada que nos permite la fuente sintonizable (de 2,58 a 3,59), la máxima diferencia de constante de propagación normalizada entre el modo rápido y el modo lento se sitúa a una frecuencia normalizada de 2,6 (en la figura, se muestra en una línea sólida gruesa en el eje $b = 0$, que nos indica el margen posible de frecuencias normalizadas).

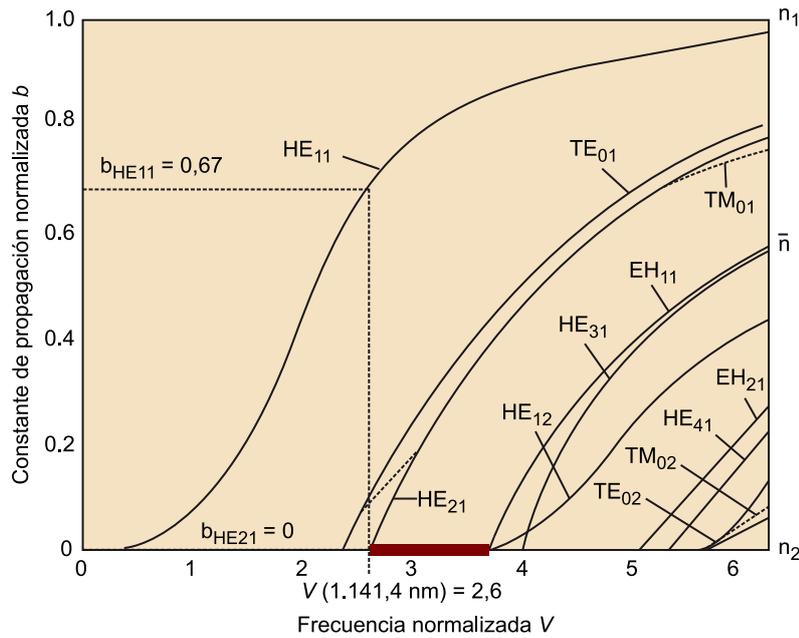


Figura 18. Búsqueda de la constante de propagación normalizada

La longitud de onda de emisión de la fuente sintonizable que corresponde a una frecuencia normalizada de 2,6 y que, por lo tanto, proporcionará una mejor precisión en la medida será:

$$\lambda = \frac{2\pi}{2,6} \cdot 2,75 \mu\text{m} \cdot \sqrt{1,48^2 - 1,47^2} = 1,1414 \mu\text{m} \quad (79)$$

Siguiendo el mismo procedimiento empleado en el primer apartado, a partir de la gráfica b - V encontramos las constantes de propagación normalizadas (b) de los diferentes modos que se propagan a una frecuencia normalizada de 2,6. Nos centramos con las constantes de propagación normalizadas del modo que viaja más rápido (HE_{21}) y del modo que viaja más lento (HE_{11}).

Hay que notar que a una frecuencia normalizada de 2,6 apenas arranca el modo HE_{21} , es decir, apenas empieza a propagarse y, por lo tanto, llevaremos a cabo la aproximación a $b_{\text{HE}_{21}} = 0$ (esta condición es precisamente la condición de corte del modo, es decir, que la constante de propagación normalizada valga cero indica que este no se propaga, pero está justo en el umbral de hacerlo).

A partir de las dos frecuencias normalizadas ($b_{\text{HE}_{21}}$ y $b_{\text{HE}_{11}}$), podemos encontrar el índice de refracción efectivo del modo que viaja más rápido ($n_{\text{HE}_{21}}$) y del modo que viaja más lento ($n_{\text{HE}_{11}}$).

$$b = \frac{\bar{n} - n_2}{n_1 - n_2} \quad (80)$$

Entonces,

$$\bar{n} = b(n_1 - n_2) + n_2 \quad (81)$$

$$n_{\text{HE11}} = 0,67 \cdot (1,48 - 1,47) + 1,47 = 1,4767 \quad (82)$$

$$n_{\text{HE21}} = 0 \cdot (1,48 - 1,47) + 1,47 = 1,47 \quad (83)$$

El ensanchamiento del pulso corresponde a la diferencia temporal entre el modo que viaja más rápido y el modo que viaja más lento. Por lo tanto:

$$\sigma_t = \frac{L}{c_0} |n_{\text{HE21}} - n_{\text{HE11}}| \quad (84)$$

Finalmente,

$$\frac{\sigma_t}{L} = \frac{0,0067}{c_0} \quad (85)$$

c) Este sistema de medida se basa en el hecho de que la fibra se comporte como multimodo en la longitud de onda de medida. Para saber el margen de funcionamiento de este sistema, hay que cumplir que $\lambda = 1,234 \mu\text{m}$ para estar en la región multimodo y, además, tener en cuenta que habrá un margen de longitudes de onda de emisión que está determinado por el margen de funcionamiento de la fuente sintonizable. Con estas condiciones, el sistema de medida se sitúa en un margen de longitudes de onda en el que la atenuación de la fibra óptica toma valores entre 1 y 3 dB/km, lo que supone atenuaciones en todo el enlace propuesto de entre 100 y 300 dB. Estos valores de atenuación son demasiado elevados como para llegar con suficiente potencia al receptor. En los sistemas de comunicación por fibra óptica de estas características, no tienen suficiente margen dinámico para soportar atenuaciones tan elevadas. Por lo tanto, no sería posible implementar este sistema por la alta atenuación de la fibra óptica a las longitudes de onda de medida.

5. Efectos no lineales

Los efectos no lineales se producen cuando inyectamos suficiente potencia en la fibra para que esta no se comporte de manera lineal. Estos efectos son especialmente críticos cuando tenemos sistemas WDM en los que la potencia total inyectada es la potencia de cada canal por el número de canales. Los efectos no lineales provocarán degradaciones en el sistema y, por lo tanto, suponen una limitación para el enlace.

Los efectos no lineales no son deseados en los sistemas de comunicaciones ópticas, pero como ventaja se pueden aprovechar para hacer componentes ópticos que extraigan provecho de estas no linealidades. De esta manera, se pueden construir amplificadores ópticos, filtros, convertidores de longitud de onda, etc. que basan su principio de funcionamiento en las no linealidades.

El estudio de las no linealidades se puede afrontar de maneras muy distintas. En este apartado, se hace desde la vertiente del diseño de sistemas de comunicaciones ópticas. Por lo tanto, el interés reside en conocer las causas, las consecuencias y la solución de estos efectos, así como la dependencia de los efectos con otros parámetros de diseño de la fibra óptica.

5.1. Ganancia no lineal y parámetros del sistema

Si dos ondas ópticas entran en un medio no lineal, estas interactuarán entre sí. Considerando las dos ondas con potencia P_1 y P_2 y a longitudes de onda distintas, la interacción se puede modelar de la manera siguiente:

$$P_1(L) = P_1(0) e^{\left(\frac{gP_2L}{A}\right)} \quad (86)$$

Esta expresión nos indica que cuando estas ondas se propagan por un medio no lineal, hay un traspaso de potencia de una onda a la otra. En el caso descrito, P_2 suministra potencia a P_1 . Mediante la expresión, podemos calcular la potencia en cualquier punto ($P_1(L)$).

El traspaso de potencia sigue una forma exponencial y depende del área común de las dos ondas, de la potencia de la segunda onda, de la longitud recorrida y de un parámetro propio de cada no linealidad, que es el coeficiente de ganancia no lineal. Este coeficiente nos da idea de la fuerza de la no linealidad.

Referencia bibliográfica

P. Govind Agrawal (2006). *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press.

El modelo presentado en la mayoría de las ocasiones se ajusta poco a la realidad, puesto que se ha asumido que la polarización de las dos ondas es la misma y que no hay deflexión del bombeo. Una expresión más cuidadosa es la siguiente:

$$P_1(L) = P_1(0) e^{\left(\frac{gP_2 L_e}{bA_e} \right)} \quad (87)$$

En esta nueva expresión, se ha considerado lo siguiente:

- El área efectiva, que es el área de encabalgamiento de las dos ondas (por lo tanto, se basa en la distribución de campo del modo).
- La longitud efectiva, que es la longitud en la que tenemos interacción no lineal entre las ondas (si el enlace fuera largo, solo habría no linealidades al principio).
- El parámetro de polarización b .

Respecto al área efectiva, si consideramos que la propagación es monomodo y que las dos ondas no están muy alejadas en frecuencia, entonces las dos ondas tendrán distribuciones de campo similares y, por lo tanto, el encabalgamiento de los dos modos será prácticamente igual a la distribución de campo del modo. Al tratarse de una propagación monomodo y sabiendo que en un corte transversal del modo HE_{11} la distribución de campo tiene una forma circular, podemos calcular el área efectiva a partir del diámetro efectivo o del diámetro de la distribución de campo del modo (MFD) empleando la expresión siguiente.

$$A_e = \pi \cdot \left(\frac{d_e}{2} \right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{MFD}{2} \right)^2 \quad (88)$$

En caso de no disponer del área efectiva o de alguno de los parámetros a partir de los cuales la podemos calcular, entonces utilizaríamos el área del núcleo de la fibra óptica ($A_e = A$). La aproximación al área del núcleo de la fibra óptica es una aproximación de cariz restrictivo, puesto que el área del núcleo siempre será menor que el área efectiva². Hay que notar que de cara a la degradación provocada por las no linealidades, es peor un área pequeña puesto que para una misma potencia tenemos una intensidad más alta ($I = P/A$) y, por lo tanto, el medio es más susceptible de ser no lineal.

⁽²⁾Por óptica electromagnética, hemos visto que la luz no se propaga solo por el núcleo sino por el núcleo y el revestimiento.

Respecto al valor de la longitud efectiva, si el tramo de fibra es corto, se puede aproximar a la longitud física del enlace. En cambio, si el enlace es largo, se aproxima a la inversa de las pérdidas (las pérdidas expresadas de manera lineal, no en dB/km).

- Enlace corto: $L_e = L$
- Enlace largo: $L_e = \frac{1}{\alpha}$

Lectura de la fórmula

$$\alpha = \frac{\alpha \text{ dB/km}}{10 \log e}$$

El proceso que hay que seguir es, a partir de la atenuación por kilómetro, calcular la longitud efectiva suponiendo que el enlace es largo. Una vez disponemos del resultado, ya tenemos una referencia para determinar si el enlace que estamos tratando es largo o corto. Si la longitud efectiva que hemos calculado es superior a la longitud de fibra, entonces el enlace es corto (y haremos la aproximación $L_e = L$). Si la longitud efectiva que hemos calculado es inferior a la longitud de fibra, entonces el enlace es largo (y haremos la aproximación $L_e = \frac{1}{\alpha}$).

Respecto al parámetro de polarización b , puede tener dos valores:

- $b = 1$ si se trata de una fibra mantenedora de la polarización (PMF).
- $b = 2$ si se trata de una fibra que no mantiene la polarización, es decir, una fibra estándar.

En el caso del diseño de un sistema de comunicaciones ópticas, habitualmente utilizaremos el valor $b = 2$.

Una vez hemos visto de manera general cuáles son los parámetros que intervienen en las no linealidades, veremos cuáles son las causas y los efectos de las principales no linealidades.

Las no linealidades pueden ser de dos tipos:

- Las no linealidades provocadas por la dispersión estimulada inelástica. De estas, estudiaremos el efecto Raman (SRES) y el efecto Brillouin (SBS).
- Las no linealidades provocadas por la refracción no lineal. De estas, estudiaremos el efecto *four wave mixing* (FWM) y el efecto *carrier induced phase modulation* (CIP) que, a su vez, se separa en *self phase modulation* (SPM) y el *cross phase modulation* (XPM).

5.2. Efecto Raman

El efecto Raman es un efecto no lineal que limita algunos sistemas de comunicaciones ópticas. Este efecto se debe a la interacción entre la luz y las vibraciones de las moléculas de silicio. La frecuencia de vibración de las moléculas se denomina frecuencia de Stokes.

La luz dispersada por las moléculas experimenta un desplazamiento en frecuencia hacia frecuencias menores. Este cambio corresponde a la frecuencia de vibración de las moléculas.

La frecuencia de Stokes no es única. Acabamos teniendo una dependencia espectral del coeficiente de ganancia no lineal g .

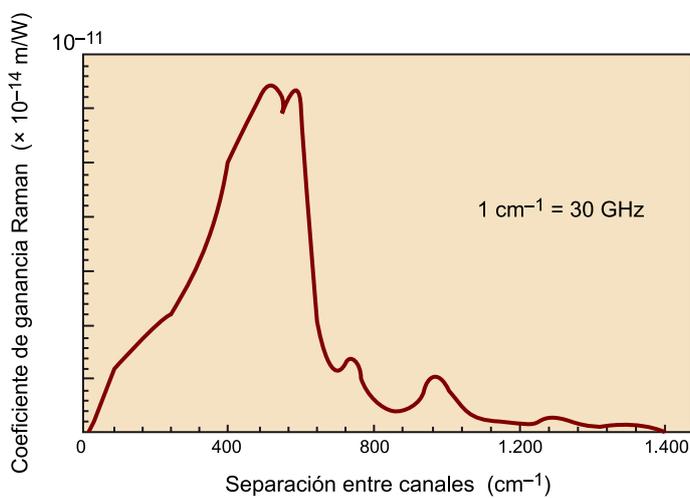


Figura 19. Gráfica de la frecuencia de Stokes

Si dos ondas, separadas por la frecuencia de Stokes, se inyectan en un medio Raman, la onda de baja frecuencia sufrirá una amplificación a expensas de la de más frecuencia.

En la gráfica anterior, podemos deducir que la ganancia no lineal del sistema sube de manera prácticamente lineal hasta una separación de unos 460 cm^{-1} , que corresponde a 13.800 GHz . Por lo tanto, la interacción máxima se producirá entre frecuencias separadas entre sí $13,8 \text{ THz}$.

De la gráfica, también se puede extraer que el ancho de banda del efecto Raman será de unos 6 THz .

En el caso de un sistema de un solo canal, se dispersará luz por el efecto Raman, pero la potencia necesaria suele ser elevada. En este caso, la portadora inyectada generará otra onda por efecto Raman.

La expresión de diseño del efecto Raman para sistemas con un solo canal es:

Chandrasejara Venkata Raman

(Trichinopoly, 1888; Bengaluru, 1970) Premio Nobel de física. Conocido por sus estudios sobre la difracción de la luz y por ser el descubridor del efecto Raman.

$$P_c = \frac{16 \cdot b \cdot A_e}{g_R \cdot L_e} \quad (89)$$

En esta expresión, P_c es la potencia crítica y corresponde a la potencia que se inyecta a la fibra óptica y que hace que debido al efecto Raman, suframos una disminución de potencia en el sistema de 3 dB. Hay que notar que el interés reside en tener la potencia crítica más elevada posible. Si disponemos de una potencia elevada, tenemos más permisividad a la hora de inyectar potencia en la fibra. Una potencia crítica baja implicará una limitación y tendremos que moderar la potencia inyectada en la fibra.

Para obtener una potencia crítica elevada, será necesaria un área efectiva elevada y, como ya hemos comentado, cuanto más área y por la misma potencia inyectada, tendremos una intensidad más baja y, en consecuencia, menos no linealidades. Observemos que aparece un compromiso: por un lado, interesa un área efectiva elevada para no sufrir no linealidades, pero por otro lado, si el área es grande podemos pasar de la región monomodo a la región multimodo. Observemos que las no linealidades dependen del área efectiva (área del modo) y la frecuencia de corte de la fibra óptica depende del área del núcleo. Si aprovechamos esta diferencia, se pueden fabricar fibras que tienen un área efectiva grande y continúan trabajando como fibras monomodo, y que se conocen como *large effective area fiber (LEAF)*.

Para conseguir una potencia crítica alta, interesa tener una longitud efectiva baja. Se trata de un hecho lógico, puesto que para no sufrir demasiadas no linealidades hará falta una longitud de interacción no lineal baja. Además, para tener una longitud efectiva baja, y considerando el enlace largo, necesitaremos que la atenuación sea alta. Aparece, por lo tanto, un nuevo compromiso en lo referente a la atenuación de la fibra óptica: por una parte, interesa que sea alta para sufrir menos no linealidades y, por otra, interesa que sea baja para cumplir con el balance de potencia.

Respecto a la ganancia no lineal del sistema, hay que decir que al tratar el efecto Raman en el diseño de enlaces de comunicaciones ópticas se utiliza el coeficiente de ganancia $g = 7 \cdot 10^{-12}$ cm/W.

En el caso de sistemas con varios canales multiplexados en longitud de onda (WDM), la potencia por canal para excitar el efecto Raman es inferior a la de sistemas con un solo canal. El criterio de diseño que hay que seguir para que el sistema sea válido para el efecto Raman en el caso de sistemas multicanal (WDM) es:

$$(N \cdot P) \ll [(N - 1) \cdot \Delta f] < 500 \text{ GHz} \cdot W \quad (90)$$

Lectura de la fórmula (90)

N : número de canales.
 Δf : separación entre canales.
 P : potencia máxima por canal.

5.3. Efecto Brillouin

El efecto Brillouin se debe a la interacción de la luz y las variaciones de densidad con dependencia temporal. Estas variaciones de densidad pueden ser causadas por ondas de presión que viajan por la fibra (fonones acústicos).

La expresión de diseño del efecto Brillouin para sistemas con un solo canal es:

$$P_c = \frac{21 \cdot b \cdot A_e}{g \cdot L_e} \quad (91)$$

En el caso del efecto Brillouin, la ganancia no lineal varía según el ancho de banda de la señal. La ganancia máxima del efecto Brillouin se produce con láseres de bombeo con funciones de línea menores de 20 MHz. En el supuesto de que el ancho de banda resulte superior, la ganancia será:

$$g = g_b \frac{\Delta \nu_b}{\Delta \nu_1} \quad (92)$$

Respecto al ancho de banda del efecto Brillouin ($\Delta \nu_b$), es muy pequeño (20 MHz) comparado con el del efecto Raman (6 THz).

Hay que decir que la potencia crítica depende de la ganancia no lineal del sistema, y esta depende del ancho de banda (de la velocidad de bit y de la modulación utilizada). Por lo tanto, al ensancharse la portadora por el hecho de modular a alta velocidad de bit, tendremos menos efecto Brillouin.

La frecuencia a la que se dispersa la luz depende de la velocidad del sonido en la fibra óptica y del índice de refracción. En el caso de una fibra SMF trabajando en la tercera ventana, la separación frecuencial entre la portadora y la luz dispersada es de 11 GHz. Puesto que la dispersión de la luz se produce a frecuencias cercanas, en un sistema WDM el efecto Brillouin de un canal no afectará a los canales vecinos y, por lo tanto, la potencia crítica es independiente del número de canales.

El sentido de propagación de la nueva onda generada fruto del efecto es en sentido contrario (contrapropagado) a la señal original. En un sistema de comunicaciones ópticas esto puede ser problemático, puesto que la nueva onda se propaga hacia el transmisor. Para evitar problemas en caso de sufrir este efecto, será necesario incluir aisladores (componente que deja pasar la luz en un sentido y la bloquea si va en sentido contrario) en el sistema.

5.4. Efecto CIP

El efecto *CIP* (*carrier induced phase modulation*) se puede tratar de dos maneras distintas, dependiendo del tipo de sistema que estemos considerando:

- La *SPM* (*self phase modulation*), para sistemas con un solo canal.
- La *XPM* (*cross phase modulation*), para sistemas multicanal.

La causa del CIP es que el índice de refracción depende de la intensidad de la señal aplicada. Las variaciones de intensidad de la portadora se traducen en variaciones de índices de refracción, y estas en variaciones de velocidad y, finalmente, en variaciones de fase.

El índice de refracción que depende de la intensidad de la señal vale lo siguiente.

$$n(I) = n_0 + n_2 I \quad (93)$$

A partir del índice de refracción, podemos encontrar la fase. La expresión de la variación de fase de la señal por el hecho de propagarse por un tramo de fibra de longitud L es la siguiente.

$$\phi(L) = \beta \cdot L = k_0 \cdot n(I) \cdot L = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n(I) \cdot L \quad (94)$$

$$\phi(L) = \frac{2\pi n_0 L}{\lambda} + \frac{2\pi n_2 I L}{\lambda} \quad (95)$$

Estos efectos no degradan el sistema si se trata de un sistema en el que solo se tiene en cuenta la amplitud de la señal y no la fase; por ejemplo, los sistemas IM/DD que emplean modulación *on/off keying* (OOK).

5.5. Efecto FWM

El efecto *four wave mixing* (FWM) es similar a la intermodulación de tercer orden. Por el hecho de entrar en un medio no lineal dos o más portadoras, se generarán otras nuevas.

Alguna de estas nuevas portadoras se puede encabalar con una portadora con información y, por lo tanto, puede ser una interferencia directa. Al ser necesarias dos o más portadoras, este efecto no se da en sistemas con un solo canal, sino que solo se debe considerar en sistemas WDM.

La potencia de las nuevas portadoras generadas por el FWM depende del parámetro de eficiencia del mismo. La eficiencia del FWM se relaciona con la separación entre canales y el tipo de fibra. Cuanto más cercanos estén los canales, más problemas de FWM podemos tener (si separamos mucho los canales, en-

Lectura de la fórmula (93)

n_0 : índice de refracción ordinario (índice asociado a cada material).

n_2 : índice de refracción que depende de la intensidad.

I : intensidad óptica (se relaciona con la potencia óptica $I = P/A$).

tonces podemos tener más problemas con el efecto Raman y, por lo tanto, hay un compromiso). De cara al FWM, es más crítico utilizar fibras con dispersión cero que fibras estándar. Esta es la razón por la que hoy día no se utiliza la fibra ZDF, sino la NZDF.

6. Ejemplos de cálculo de los efectos limitadores de enlaces de comunicaciones ópticas

En este apartado, veremos algunos ejercicios de diseño de enlaces de comunicaciones ópticas. Los ejercicios plantean el análisis de los efectos limitadores, tanto de los sistemas con una sola portadora como de los sistemas multiplexados en longitud de onda o multiportadora (WDM). Se adjunta una solución detallada de los problemas planteados, que tiene que ser de utilidad para reforzar los diferentes conceptos vistos en la parte de teoría.

6.1. Ejemplo I

Queremos diseñar un enlace por fibra óptica de una longitud de 80 km. El enlace es IM/DD con una sola portadora a 2,5 Gb/s.

Las características del emisor son las siguientes:

- Longitud de onda de emisión: 1.530 - 1.570 nm.
- Potencia óptica de salida: mín. 2 mW.
- Ancho de banda espectral (FWHM, modulado a 2,5 Gb/s): 0,2 - 0,3 nm.

En lo que respecta al receptor, el fabricante nos propone dos modelos:

- Uno con fotodiodo PIN.
- Otro con fotodiodo APD.

Elegimos la versión con fotodiodo PIN.

Las características ópticas del receptor son las siguientes.

- Sensibilidad (medida a 2,5 Gb/s para un BER de $3 \cdot 10^{-11}$):
 - Versión APD: -32 dBm a -30 dBm.
 - Versión PIN: -23 dBm a -21 dBm.

La fibra óptica que hay que utilizar tiene las características siguientes.

- Atenuación:
 - Coeficiente de atenuación a 1.310 nm: 0,34 - 0,39 dB/km.
 - Coeficiente de atenuación a 1.385 nm: 0,31 dB/km.
 - Coeficiente de atenuación a 1.550 nm: 0,19 - 0,23 dB/km.
- Dispersión cromática:
 - Longitud de onda de dispersión cero (λ_{ZD}): 1.300 - 1.322 nm.

- **Slope (S_0): 0,092 ps/nm²·km**
- **Diámetro efectivo (*mode field diameter, MDF*):**
 - **MFD a 1.310 nm: 9,2 ± 1,0 μm.**
 - **MFD a 1.550 nm: 10,5 ± 1,0 μm.**
- **Longitud de fibra:**
 - **Longitud de los carretes de fibra: 6,4; 12,6; 19,2; 25 y 38,2 km.**
- **Otras características:**
 - **Diámetro del núcleo: 6 μm.**
 - **Índice de refracción relativo: 0,0068.**
 - **Índice de refracción del revestimiento: 1,45.**

Otros componentes:

- **Pérdidas de un conector a 1.550 nm: 1 dB.**
- **Pérdidas de una unión a 1.550 nm: 0,2 dB.**

Haced el cálculo de las posibles limitaciones que tendremos en el enlace. Evaluad los efectos que pueden causar degradación en este tipo de enlace. Si el enlace no cumple para uno de los efectos, continuad calculando los otros. Comentad cada uno de los resultados obtenidos.

Este ejercicio trata uno de los problemas más comunes a la hora de hacer el diseño de un sistema de comunicaciones ópticas punto a punto. Una vez elegidos los componentes que hay que utilizar y a partir de las características que encontremos en las hojas de especificaciones que nos proporcionan los fabricantes, tenemos que determinar las limitaciones del enlace de fibra óptica.

Hay que decir que las características que encontramos en las hojas de especificaciones no nos proporcionan un valor exacto de cada parámetro, sino que nos dan el margen de valores que puede tomar el parámetro (especificado por un valor máximo, un valor mínimo y/o un valor típico). Al consultar estos parámetros en las hojas de especificaciones, nos damos cuenta de que suelen tener márgenes bastante generosos. Esto se debe al hecho de que hay incertidumbres y derivas en el proceso de fabricación de los componentes. Debemos decir que el diseño se hace a partir de los valores que se encuentran en las hojas de especificaciones.

Con el diseño y el cálculo de las limitaciones, se hace la validación de la elección de componentes. Los componentes se encargan al fabricante y este los proporciona normalmente con una hoja de especificaciones con la medida exacta de los parámetros para el componente en particular que hemos comprado. Obviamente, los parámetros particulares del componente cumplen los márgenes que encontramos en las hojas de especificaciones generales.

En este problema, haremos el diseño del enlace punto a punto teniendo en cuenta las hojas de especificaciones generales. Puesto que el fabricante proporciona un margen para cada parámetro y nosotros utilizamos un valor concreto para aplicar la fórmula y determinar las limitaciones, entonces estableceremos como criterio para seguir la elección del valor más crítico, que es el que más limita el sistema. Con el valor más crítico o limitador, sufriremos más no linealidades, dispersión o atenuación. Por lo tanto, al elegir este valor, buscaremos tanto el sentido matemático como el sentido físico o conceptual de la elección.

Para resolver las limitaciones de este enlace, en primer lugar será necesario hacer un cálculo de la limitación debida a la atenuación (que validaremos mediante el balance de potencia), después haremos un cálculo de la dispersión y, por último, trataremos las no linealidades que pueden afectar al sistema.

1) Limitación debida a la atenuación

La limitación debida a la atenuación la validamos haciendo el balance de potencia. De manera previa al cálculo del balance, hacemos unas consideraciones.

- En lo que respecta a la potencia entregada por el láser (P_{TX}), el fabricante solo proporciona el valor mínimo. La utilización de este valor mínimo es correcta, puesto que se trata del caso más crítico: si inyectamos poca luz en la fibra y llega poca luz al receptor. Por lo tanto, utilizaremos 2 mW, que en unidades logarítmicas corresponde a 3 dBm.
- Se trata de un enlace de 80 kilómetros de longitud y el fabricante nos proporciona carretes de diferentes longitudes (6,4; 12,6; 19,2; 25 y 38,2 km). En este caso, proponemos la utilización de dos carretes de 38,2 km y un trozo de fibra adicional de 3,6 km para llegar a los 80 km del enlace. Así pues, el sistema tiene tres tramos de fibra, lo que indicará que se necesitan dos uniones de fibra para unir los tres tramos y dos conectores para unir la fibra al emisor y al receptor.
- El fabricante de la fibra óptica indica que en la ventana de trabajo (tercera ventana), la atenuación puede tomar valores en el margen de 0,19 a 0,23 dB/km. El peor caso ocurrirá cuando se atenúe más, puesto que será cuando llegue menos potencia al receptor. El valor que elegimos para hacer el balance de potencia es 0,23 dB/km.
- Respecto a la sensibilidad del receptor, el fabricante nos indica que en la versión PIN es típicamente de -23 dBm y puede llegar a ser de -21 dBm. Elegimos el valor -21 dBm, puesto que en esta situación se requiere más potencia en la entrada del receptor y, por lo tanto, se trata del peor caso. Hay que comentar que el parámetro de la sensibilidad nos indica la potencia en la entrada del receptor necesaria para mantener un BER determina-

do. Por lo tanto, si la potencia en la entrada del receptor es un poco inferior a la sensibilidad, no dejaremos de recibir, sino que recibiremos con más errores de los permitidos.

- En este enlace nos proporcionan la potencia del emisor, las pérdidas de los conectores y uniones que tenemos en el enlace, la atenuación por kilómetro de la fibra óptica y la sensibilidad del receptor. El balance de potencia nos será útil para determinar si el sistema está bien dimensionado. Para determinar esto, encontraremos el margen de seguridad (M) que se aplicaría al sistema y evaluaremos a partir de este parámetro si el sistema está sobredimensionado, infradimensionado o bien dimensionado. El margen de seguridad, tal y como su nombre señala, es un parámetro que indica el margen de potencia sobrante de nuestro sistema antes de llegar a no cumplir el balance de potencia. Desde otro enfoque, el margen de seguridad es aquel parámetro que indica el sobredimensionado lógico que hacemos al sistema para que este continúe funcionando pese al envejecimiento de los componentes o la fibra. El valor del margen de seguridad suele ser de unos 3 dB.

A partir de estas consideraciones, ya podemos hacer el cálculo del balance de potencia:

$$P_{TX} > S_{RX} + L_{con} + L_{unión} + \alpha L + M \quad (96)$$

$$3 \text{ dBm} > -21 \text{ dBm} + 2 \text{ dB} + 0,4 \text{ dB} + 0,23 \text{ dB/km} \cdot 80 \text{ km} + M \quad (97)$$

$$M > 3,2 \text{ dB} \quad (98)$$

Tal y como hemos comentado, este valor de margen de seguridad es habitual a la hora de hacer el diseño de los sistemas de comunicaciones ópticas. La potencia de 2 mW (que corresponde a la mínima del emisor) es suficiente para cumplir el balance de potencia y, por lo tanto, no tendremos problemas con la atenuación.

2) Limitación debida a la dispersión

En primer lugar, será necesario averiguar si en la longitud de onda de trabajo la fibra se comporta como monomodo o multimodo, para determinar de este modo si nos afectará la dispersión modal o la dispersión cromática.

Calcularemos primero la frecuencia normalizada en la longitud de onda de trabajo.

A partir de Δ , encontraremos el valor del índice de refracción del núcleo:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (99)$$

$$0,0068 = \frac{n_1 - 1,45}{n_1} \rightarrow n_1 = 1,46 \quad (100)$$

Calculamos la frecuencia normalizada:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{1,55 \mu\text{m}} \cdot 3 \mu\text{m} \cdot \sqrt{1,46^2 - 1,45^2} = 2,07 \quad (101)$$

Puesto que el resultado anterior es inferior a la frecuencia normalizada de corte de la fibra óptica ($V = 2.405$), podemos concluir que la fibra se comporta como monomodo y que solo afectará a la dispersión cromática.

Calcularemos la dispersión cromática a partir de la expresión:

$$\sigma_t = D \cdot \Delta\lambda \cdot L \quad (102)$$

El parámetro de dispersión lo proporciona el fabricante de la fibra óptica, ya sea a partir de la gráfica del parámetro de dispersión (D) respecto de la longitud de onda (λ) o de parámetros que se añaden a una función que interpola la gráfica de D respecto de λ . Este último caso es el que nos encontramos en este problema.

A partir del *slope* (S_0) y de la longitud de onda de dispersión cero (λ_{ZD}), encontraremos el parámetro de dispersión (D) en la longitud de onda de trabajo.

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_{ZD}^4}{\lambda^3} \right] \quad (103)$$

En la hoja de especificaciones que nos proporciona el fabricante de la fibra óptica, encontramos que la longitud de onda de dispersión cero puede tomar un valor entre 1.300 nm y 1.322 nm. Elegiremos 1.300 nm porque es el peor caso. Un valor bajo de longitud de onda de dispersión cero implica un valor alto de parámetro de dispersión, que al mismo tiempo provoca un mayor ensanchamiento (σ_t). Al tener un mayor ensanchamiento, habrá más limitación de velocidad.

Hagamos un planteamiento similar al elegir el valor de $\Delta\lambda$, que corresponde al ancho de banda de la señal inyectada en la fibra. Elegimos el valor de $\Delta\lambda$ más alto (0,3 nm), puesto que será el valor que provocará más ensanchamiento y, por lo tanto, el peor caso.

Calculamos el parámetro de dispersión y, a partir de este, el ensanchamiento temporal del pulso:

Lectura de la fórmula (102)

L: longitud del enlace.
 $\Delta\lambda$: ancho de banda de la señal inyectada en la fibra, expresado en longitud de onda.
 D: parámetro de dispersión.

$$D(1.550 \text{ nm}) = \frac{0,092 \text{ ps/nm}^2 \cdot \text{km}}{4} \left[1.550 \text{ nm} - \frac{(1.300 \text{ nm})^4}{(1.550 \text{ nm})^3} \right] = 17,4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km} \quad (104)$$

$$\sigma_t = 17,4 \text{ ps/nm} \cdot \text{km} \cdot 0,3 \text{ nm} \cdot 80 \text{ km} = 417,6 \text{ ps} \quad (105)$$

No podemos afirmar si el valor de ensanchamiento temporal obtenido es apto o no si no lo referenciamos a la velocidad de nuestro sistema (2,5 Gb/s). Al tratarse de un sistema con un formato *non return to zero* (NRZ), imponemos la limitación de que el ensanchamiento del pulso no sea mayor que un cuarto del tiempo de bit. Por lo tanto:

$$\sigma_t < \frac{1}{4} T_b = 100 \text{ ps} \quad (106)$$

Podemos observar que el ensanchamiento que sufriremos será superior al máximo permitido. Por lo tanto, el sistema no cumplirá por dispersión cromática. Se tendrá que seguir alguna estrategia para solucionar este problema, como por ejemplo utilizar compensadores de la dispersión cromática o fibras compensadoras de la dispersión (DCF).

3) Efectos no lineales

Se trata de un sistema de comunicaciones ópticas que se basa en un enlace punto a punto con una sola portadora. El sistema empleado es *on off keying* (OOK), en formato *non return to zero* (NRZ) e *intensity modulation / direct detection* (IM/DD). Bajo estas condiciones, los efectos no lineales que pueden degradar el sistema son básicamente el efecto Raman y el efecto Brillouin. El *four wave mixing* (FWM) solo afecta a los sistemas WDM y, por lo tanto, no degradará este sistema.

El efecto *carrier induced phase noise* (CIP) puede ser de dos tipos.

- *Cross phase modulation* (XPM): no degradará nuestro sistema, puesto que solo afecta a los sistemas WDM.
- *Self phase modulation* (SPM): provoca cambios de fase debidos a cambios de intensidad óptica. En el caso del sistema que estamos tratando, los cambios de fase no degradan el sistema, puesto que se trata de un sistema IM/DD y la detección es por amplitud.

4) Efecto Raman

Al tratarse de un sistema con una sola portadora, obtendremos la potencia crítica con la expresión:

$$P_c = \frac{16 \cdot b \cdot A_e}{g_R \cdot L_e} \quad (107)$$

Cálculo de los parámetros necesarios para calcular la potencia crítica:

- Puesto que se trata de una fibra óptica monomodo estándar (no mantiene la polarización), entonces $b = 2$.
- $g_R = 7 \cdot 10^{-14} \text{ m/W}$
- Para calcular el área efectiva de la fibra óptica emplearemos el parámetro *mode field diameter (MFD)*, que nos indica el diámetro del haz de luz que se propaga por la fibra óptica.

⁽³⁾Recordad que frecuencia y longitud de onda son inversamente proporcionales.

Observad que este diámetro es mayor que el diámetro del núcleo de la fibra óptica. Esto se debe al hecho de que la luz no viaja de manera exclusiva por el núcleo de la fibra óptica, sino una parte por el núcleo y otra por el revestimiento.

Observad también que el MDF o diámetro efectivo es mayor en la segunda ventana que en la tercera ventana: este hecho se corrobora a partir de la gráfica b-V. La tercera ventana tiene una frecuencia normalizada (V) menor que la segunda ventana³. Si nos encontramos en la región monomodo y, por lo tanto, se propaga solo el modo fundamental (HE₁₁) a menor frecuencia normalizada (V), tendremos menor constante de propagación normalizada (b). Si el valor de la constante de propagación normalizada es bajo, entonces el índice efectivo (n_{eff}) es cercano al índice de refracción del revestimiento (n_2) y, por lo tanto, la luz se propagará de manera mayoritaria por el revestimiento, lo que implicará un diámetro efectivo grande y, de este modo, también un área efectiva grande.

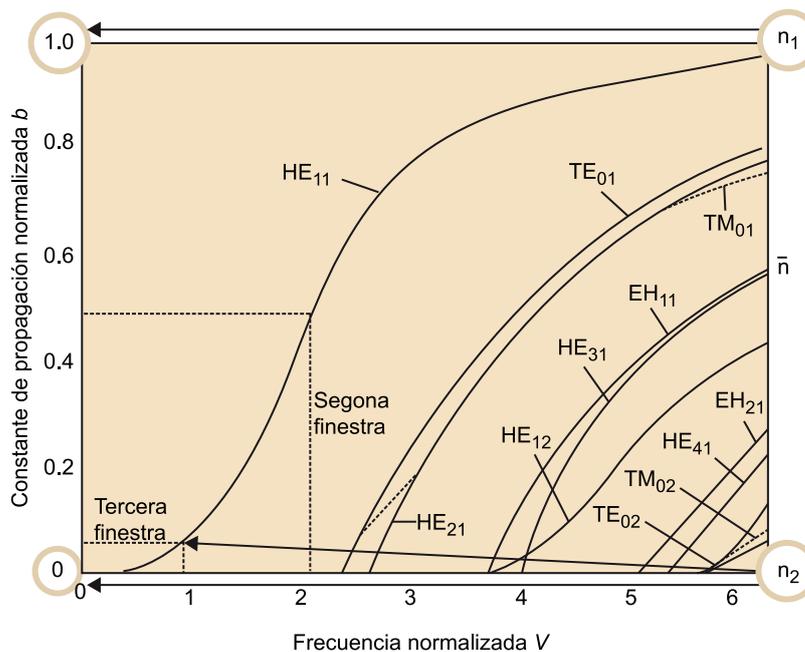


Figura 20. Gráfica b-V. Constantes de propagación normalizadas

- Ahora calcularemos el área efectiva de la fibra óptica a partir del parámetro *mode field diameter* (MFD). Observemos que la hoja de especificaciones del fabricante de fibra indica que el MFD vale $10,5 \pm 1,0 \mu\text{m}$ en la tercera ventana. Por lo tanto, elegiremos un valor entre $9,5 \mu\text{m}$ y $11,5 \mu\text{m}$. Lógicamente, lo haremos siguiendo el criterio de diseño para el peor caso posible. Vemos que un MFD bajo (en este caso $9,5 \mu\text{m}$) nos daría un área efectiva baja y, por lo tanto, esto daría como resultado una potencia crítica baja. Una potencia crítica baja es el caso más crítico y menos deseado. Indica que tendremos menos margen de potencia para inyectar en la fibra o, dicho de otro modo, que al aumentar la potencia llegaremos antes a sufrir la no linealidad (con menos potencia, degradaremos el sistema).

$$A_e = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{\text{MFD}}{2}\right)^2 = \pi \cdot \left(\frac{9,5 \mu\text{m}}{2}\right)^2 = 70,88 \mu\text{m}^2 \quad (108)$$

Justificación conceptual

Esta justificación claramente matemática se puede complementar con una justificación más conceptual: si el diámetro efectivo es pequeño, entonces el área es pequeña. Por lo tanto, para la misma potencia óptica, la luz quedará confinada en un área menor y, por consiguiente, la intensidad óptica será más elevada y sufriremos más degradación debido a las no linealidades.

El caso contrario se produce cuando el diámetro es grande, lo que hace que tengamos distribuida la luz en un área mayor y que, por lo tanto, tengamos menos intensidad óptica y, en consecuencia, menos fuerza en las no linealidades.

- Para calcular la longitud efectiva de la fibra óptica, emplearemos el parámetro de la atenuación por kilómetro de la fibra óptica y la longitud real del enlace. La longitud efectiva es aquella longitud de fibra en la que consideramos que sufriremos no linealidades. Para establecer esta longitud, tendremos que determinar si el enlace que estamos tratando es largo o corto. En un enlace corto, tendremos no linealidades en toda la longitud del enlace (la longitud efectiva será la longitud física). En cambio, en un enlace largo tendremos no linealidades en los primeros kilómetros (la longitud efectiva será menor que la longitud física). En un enlace largo, la longitud efectiva será independiente de la longitud física o real del enlace y solo dependerá de la atenuación por kilómetro de la fibra óptica.

Para determinar la longitud efectiva, en primer lugar supondremos que el enlace es largo y calcularemos a partir de la atenuación por kilómetro la longitud efectiva. Con este valor de longitud efectiva, ya tendremos una referencia para determinar si el enlace es largo o corto, comparándolo siempre con la longitud del enlace. Si comprobamos que la longitud física del enlace es inferior a la longitud efectiva (calculada suponiendo un enlace largo), entonces el enlace es corto y determinaremos que la longitud efectiva es la misma que la longitud física del enlace. Si por el contrario la longitud física del enlace es mayor que la longitud efectiva (calculada suponiendo un enlace largo), entonces habremos tenido razón al hacer la suposición y nos quedaremos con la longitud efectiva calculada.

El fabricante de la fibra óptica nos indica en la hoja de especificaciones que la atenuación por kilómetro de la fibra óptica es de entre $0,19 \text{ dB/km}$ y $0,23 \text{ dB/km}$. Puesto que estamos diseñando siguiendo el criterio del peor

caso, elegiremos 0,19 dB/km. Fijémonos en que una atenuación por kilómetro baja provoca una longitud efectiva alta y, por lo tanto, una potencia crítica baja (el caso más crítico). Desde un punto de vista más conceptual, una atenuación por kilómetro baja significa que la señal perderá menos potencia a medida que avance por la fibra óptica. Por lo tanto, cuanto menos señal perdamos, más largo será el tramo de fibra en el que no tendremos no linealidades.

Calculamos la longitud efectiva (haciendo la suposición de que el enlace es largo) a partir de la atenuación por kilómetro. Hay que tener en cuenta que normalmente la atenuación por kilómetro se expresa de manera logarítmica y que la fórmula de la longitud efectiva está expresada linealmente. Por lo tanto, será necesario hacer una conversión.

$$\alpha = \frac{\alpha^{\text{dB/km}}}{10 \log_e} = \frac{0,19}{10 \log_e} = 4,374 \cdot 10^{-2} \text{ km}^{-1} \quad (109)$$

$$L_e = \frac{1}{\alpha} = 22,85 \text{ km} \quad (110)$$

Una vez disponemos del resultado en el supuesto de un enlace largo, ya tenemos una referencia para determinar si el enlace que estamos tratando es largo o corto. La longitud física del enlace es de 80 km y es mayor que la longitud efectiva calculada de 22,85 km. De este modo, la suposición de que se trata de un enlace largo es válida. En nuestro sistema, solo sufriremos no linealidades en los primeros 22,85 km.

Justificación conceptual

Hay que notar que al hacer el cálculo (en el caso más crítico) de la longitud efectiva, hemos utilizado el valor de atenuación por kilómetro más bajo. En cambio, al hacer el balance de potencia (también en el peor caso) hemos empleado el valor más alto. Por lo tanto, hay un compromiso en la atenuación por kilómetro entre el balance de potencia y las no linealidades. Si elegimos una fibra con una atenuación por kilómetro elevada, no sufriremos tantas no linealidades (la longitud efectiva se reducirá), pero por otro lado, al ser la atenuación elevada quizá no tenemos suficiente potencia para llegar al nivel de la sensibilidad mínima del receptor.

Una vez disponemos de todos los parámetros, ya los podemos sustituir en la expresión de la potencia crítica de Raman:

$$P_c = \frac{16 \cdot b \cdot A_e}{g_R \cdot L_e} = \frac{16 \cdot 2 \cdot 77,88 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2}{7 \cdot 10^{-14} \text{ m/W} \cdot 22.857 \text{ m}} = 1,418 \text{ W} \quad (111)$$

Puesto que la potencia del transmisor es de 2 mW (y con esta ya cumplimos el balance de potencia), no tendremos problemas con el efecto Raman, puesto que la potencia crítica se sitúa a 1,41 vatios.

5) Efecto Brillouin

Calcularemos la potencia crítica debida al efecto Brillouin con la expresión:

$$P_c = \frac{21 \cdot b \cdot A_e}{g \cdot L_e} \quad (112)$$

**Lectura de la fórmula
(112)**

$$g = g_b \frac{\Delta \nu_b}{\Delta \nu_l}$$

Los parámetros del área efectiva (A_e), la longitud efectiva (L_e) y el parámetro de polarización (b) los hemos calculado previamente al evaluar cómo afectaba el efecto Raman al sistema. Para calcular la potencia crítica debida al efecto Brillouin, queda encontrar la ganancia no lineal del sistema (g).

Habrá que encontrar el ancho de banda en frecuencia de la portadora inyectada en la fibra. En la hoja de especificaciones encontramos el parámetro $\Delta\lambda$, que corresponde al ancho de banda de la señal inyectada en la fibra expresada en longitud de onda. El valor de este parámetro en la hoja de especificaciones oscila entre 0,2 nm y 0,3 nm. Al hacer un diseño considerando el peor caso, elegiremos 0,2 nm, puesto que un ancho de banda pequeño provoca una ganancia no lineal del sistema elevado y, por lo tanto, una potencia crítica baja.

$$\Delta \nu = \frac{c_0}{\lambda^2} \Delta \lambda = \frac{c_0}{(1.550 \text{ nm})^2} \cdot 0,2 \text{ nm} = 25 \text{ GHz} \quad (113)$$

$$g = g_b \frac{\Delta \nu_b}{\Delta \nu_l} = 4 \cdot 10^{-11} \text{ m/W} \cdot \frac{20 \text{ MHz}}{25 \text{ GHz}} = 3,2 \cdot 10^{-14} \text{ m/W} \quad (114)$$

Al hacer el diseño para el peor caso, hemos utilizado el ancho de banda más bajo. El efecto Brillouin se acusa menos en sistemas con un ancho de banda elevado. Este ancho de banda elevado de la señal inyectada en la fibra óptica puede venir tanto del ancho de banda del láser utilizado como del ancho de banda provocado por la modulación y la velocidad de bit empleada. Observemos que para no sufrir efecto Brillouin, es mejor un ancho de banda elevado. En cambio, para no sufrir dispersión cromática son necesarios anchos de banda estrechos. A la hora de analizar las especificaciones de ancho de banda, estamos en un compromiso entre la dispersión cromática y el efecto Brillouin.

Una vez encontrada la ganancia no lineal del sistema, ya podemos calcular la potencia crítica de Brillouin:

$$P_c = \frac{21 \cdot b \cdot A_e}{g \cdot L_e} = \frac{21 \cdot 2 \cdot 70,88 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2}{3,2 \cdot 10^{-14} \text{ m/W} \cdot 22,857 \text{ m}} = 4,067 \text{ W} \quad (115)$$

Puesto que la potencia del transmisor es de 2 mW (y con esta ya cumplimos el balance de potencia), no tendremos problemas con el efecto Brillouin, ya que la potencia crítica se sitúa a 4,06 vatios.

6) Conclusiones

En este problema, hemos analizado las principales limitaciones de un sistema de comunicaciones ópticas punto a punto con una sola portadora.

A partir del balance de potencia, hemos comprobado que una potencia mínima de 2 mW sería suficiente para que el sistema cumpla por atenuación.

Hemos comprobado que la fibra se comporta como monomodo en la tercera ventana, y hemos hecho un cálculo de la dispersión cromática. Hemos obtenido como resultado que el sistema no cumple en cuanto a dispersión, y se han apuntado posibles soluciones para resolver este problema.

Se ha hecho un estudio de los efectos no lineales que pueden degradar este sistema de comunicaciones ópticas. Hemos obtenido una potencia crítica debida al efecto Raman de 1,41 vatios y una potencia crítica de Brillouin de 4,06 vatios. Por lo tanto, el efecto Raman predomina sobre el efecto Brillouin. La limitación de potencia máxima admisible para no sufrir excesivamente no linealidades es la de Raman (1,41 W).

6.2. Ejemplo II

Queremos diseñar un enlace WDM con cuatro portadoras NRZ por fibra óptica operando en la tercera ventana entre dos ciudades separadas 10 km.

Las características de la fibra son las siguientes.

- Coeficiente de atenuación: 0,28 dB/km.
- Índice de refracción del núcleo: 1,46.
- Índice de refracción del revestimiento: 1,45.
- Diámetro del núcleo: 5 micrómetros.
- Diámetro efectivo: 6-8 micrómetros.
- Parámetro de dispersión cromática: 16 ps/(nm·km).
- La fibra se proporciona en bobinas de 5 km.

La sensibilidad del receptor es de -9 dBm.

La atenuación de cada unión de fibra es de 0,3 dB.

La atenuación de cada conector es de 2 dB.

La atenuación del multiplexor y del demultiplexor para cada canal es de 5 dB (incluyendo aquí sus conectores).

La velocidad de transmisión es de 10 Mbps.

La separación entre portadoras es de 100 GHz.

Decid qué características han de tener los emisores para que el enlace funcione.

Las características del emisor que podemos extraer como fruto de llevar a cabo el diseño de este enlace de comunicaciones ópticas serán las que hacen referencia a potencia de salida y a ancho de banda.

Para resolver este ejercicio, calcularemos las limitaciones del enlace y a partir de estas, encontraremos las características del emisor.

1) Limitación debida a la atenuación

Validamos la limitación debida a la atenuación haciendo el balance de potencia. Al efectuar el balance de potencia, la incógnita para buscar será la potencia de salida mínima del emisor.

Aunque se trate de un sistema multiplexado en longitud de onda, el balance de potencia se calcula para un solo canal. Las características del emisor son para un canal y no para el conjunto de canales del sistema WDM.

Teniendo en cuenta que se trata de un enlace de una longitud de 10 km, y que el fabricante proporciona bobinas o carretes de fibra de 5 km, entonces serán necesarios dos tramos y, por lo tanto, una unión de fibra, el multiplexor, el demultiplexor y los conectores del emisor y del receptor.

Escribimos la ecuación del balance de potencia:

$$P_{TX} > S_{RX} + L_{conector_TX} + L_{MUX} + L_{unión} + \alpha \cdot L + L_{DEMUX} + L_{conector_RX} + M \quad (116)$$

$$P_{TX} > -9 \text{ dBm} + 2 \text{ dB} + 5 \text{ dB} + 0,3 \text{ dB} + 0,28 \text{ dB/km} \cdot 10 \text{ km} + 5 \text{ dB} + 2 \text{ dB} + 3 \text{ dB} \quad (117)$$

$$P_{TX} > 11,1 \text{ dBm} \quad (118)$$

Expresado en unidades lineales:

$$P_{TX} > 12,882 \text{ mW} \quad (119)$$

El emisor ha de tener una potencia mínima de 12,88 mW para que el enlace funcione.

2) Limitación debida a la dispersión

Nota

Utilizad un margen de seguridad de 3 dB. Tened en cuenta los efectos no lineales.

En primer lugar, será necesario averiguar si en la longitud de onda de trabajo la fibra se comporta como monomodo o multimodo, para saber si nos afectará la dispersión modal o la dispersión cromática.

Calcularemos primero la frecuencia normalizada en la longitud de onda de trabajo.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi}{1,55 \mu\text{m}} \cdot 2,5 \mu\text{m} \cdot \sqrt{1,46^2 - 1,45^2} = 1,728 \quad (120)$$

Puesto que el resultado anterior es inferior a la frecuencia normalizada de corte de la fibra óptica ($V = 2.405$), podemos concluir que la fibra se comporta como monomodo y que nos afectará a la dispersión cromática.

El ensanchamiento debido a dispersión cromática se calcula a partir de la expresión:

$$\sigma_t = D \cdot \Delta\lambda \cdot L \quad (121)$$

De esta expresión, podemos extraer $\Delta\lambda$ como característica que indica el máximo ancho de banda que podrá tener el láser para cumplir la dispersión dentro de un canal. Este cálculo lo llevamos a cabo considerando el máximo ensanchamiento permitido para la velocidad de bit del sistema.

$$\frac{1}{4 \cdot R_b} = \sigma_t = 16 \text{ ps/nm} \cdot \text{km} \cdot \Delta\lambda \cdot 10 \text{ km} \quad (122)$$

$$\Delta\lambda < 156,2 \text{ nm} \quad (123)$$

El ancho de banda de 156,2 nm es mucho más elevado que el espaciado entre canales del sistema WDM. Por lo tanto, nos limitará antes el ancho de banda del canal que el que hemos encontrado con la dispersión cromática. Según el enunciado del ejemplo, el espaciado entre canales es de 100 GHz, que expresado en longitud de onda corresponde a 0,8 nm. La limitación de ancho de banda máximo del emisor será:

$$\Delta\lambda < 0,8 \text{ nm} \quad (124)$$

3) Efectos no lineales

Se trata de un sistema de comunicaciones ópticas que se basa en un enlace punto a punto con un sistema multiplexado en longitud de onda (WDM) con 4 canales. Con estas condiciones, los efectos no lineales que pueden degradar el sistema son básicamente el efecto Raman, el efecto Brillouin y el *four wave mixing* (FWM). El efecto FWM no lo evaluaremos, puesto que el enunciado no nos da suficiente información para determinar la degradación que provocará. El efecto *carrier induced phase noise* (CIP) se separa en el efecto *cross phase modulation* (XPM) y el *self phase modulation* (SPM). El SPM no nos afecta, puesto

Lectura de la fórmula (121)

L: longitud del enlace.
 $\Delta\lambda$: ancho de banda de la señal inyectada en la fibra, expresado en longitud de onda.
 D: parámetro de dispersión.

que solo afecta a los sistemas con una sola portadora. El XPM provoca cambios de fase en una portadora debido a los cambios de intensidad óptica de otra portadora. En el caso del sistema que estamos tratando, los cambios de fase no degradan el sistema, puesto que la detección es por amplitud.

4) Efecto Raman

Al tratarse de un sistema WDM, calcularemos la potencia crítica con la expresión siguiente.

$$(N \cdot P)[(N - 1) \cdot \Delta f] < 500 \text{ GHz} \cdot W \quad (125)$$

Esta expresión relaciona el número de canales (N), la separación entre canales (Δf) y la potencia máxima por canal (P). Lógicamente, este efecto nos supondrá una limitación en cuanto a potencia máxima por canal.

$$(4 \cdot P)[(4 - 1) \cdot 100 \text{ GHz}] < 500 \text{ GHz} \cdot W \quad (126)$$

$$P_{TX} < 0,4166 \text{ W} \quad (127)$$

Si queremos cumplir el efecto Raman, la máxima potencia que podemos inyectar en la fibra tiene que ser de 416,6 mW.

5) Efecto Brillouin

El efecto Brillouin se calcula en este sistema como si fuera un sistema con una sola portadora, ya que este efecto es independiente del número de canales.

La fórmula que determina la potencia crítica de este efecto es:

$$P = \frac{21 \cdot b \cdot A_e}{g \cdot L_e} \quad (128)$$

Y para aplicarla, será necesario encontrar los del área efectiva (A_e) y de la longitud efectiva (L_e):

$$A_e = \pi \left(\frac{d_e}{2} \right)^2 = \pi (3 \mu\text{m})^2 = 28,27 \mu\text{m}^2 \quad (129)$$

Ahora calcularemos la longitud efectiva (haciendo la suposición de que el enlace es largo) a partir de la atenuación por kilómetro. Será necesario hacer una conversión de unidades logarítmicas a unidades lineales:

$$\alpha = \frac{\alpha_{\text{dB/km}}}{10 \log e} = \frac{0,28}{10 \log e} = 6,447 \cdot 10^{-2} \text{ km}^{-1} \quad (130)$$

La longitud efectiva suponiendo un enlace largo será:

$$L_e = \frac{1}{\alpha} = 15,5 \text{ km} \quad (131)$$

Una vez disponemos del resultado en el supuesto de un enlace largo, ya tenemos una referencia para determinar si el enlace que estamos tratando es largo o corto. La longitud física del enlace es de 10 km y es menor que la longitud efectiva calculada de 15,5 km. Por lo tanto, la suposición de que se trata de un enlace largo no es válida. Al tratarse de un enlace corto, la longitud efectiva será la misma longitud que la longitud física.

$$L_e = L = 10 \text{ km} \quad (132)$$

Al buscar la ganancia no lineal del sistema, hay que considerar que con el efecto Brillouin podremos calcular la posible potencia máxima del emisor a partir de potencia crítica para este efecto, pero también habrá que tener en cuenta que está relacionado con el ancho de banda de la portadora. Esto hace que tengamos dos grados de libertad y, por lo tanto, deberemos fijar uno de los dos parámetros y buscar el otro.

Una consideración que podemos hacer es suponer el peor caso de ancho de banda al hacer el cálculo del efecto Brillouin. Este caso se produce cuando el ancho de banda es el más bajo posible. Si suponemos que el láser tiene un ancho de banda (sin modular) muy pequeño, entonces lo que predominará al calcular el ancho de banda de la señal que se inyecta en la fibra será el ancho de banda de la señal moduladora, que dependerá del formato de modulación y de la velocidad binaria. En el sistema que estamos tratando, el ancho de banda mínimo estará determinado por el formato NRZ y los 10 Mb/s de velocidad binaria, y este será de 20 MHz. Puesto que este ancho de banda es igual al valor del ancho de banda del efecto Brillouin, se cumplirá lo siguiente.

$$g = g_b \quad (133)$$

Teniendo en cuenta esto, ya podemos calcular el efecto Brillouin bajo la consideración del peor caso de ancho de banda (muy estrecho).

$$P_c = \frac{21 \cdot b \cdot A_e}{g \cdot L_e} = \frac{21 \cdot 28,27 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2}{4 \cdot 10^{-11} \text{ m/W} \cdot 10.000 \text{ m}} = 2,9 \text{ mW} \quad (134)$$

Observemos que con esta potencia crítica tan baja no podemos hacer el enlace, puesto que no cumpliríamos el balance de potencia. Por lo tanto, será necesario que la portadora tenga un ancho de banda más elevado.

Otro planteamiento para afrontar la evaluación del efecto Brillouin en este sistema es fijar la potencia máxima y buscar el ancho de banda. Dado que sabemos que en el sistema también hay que cumplir el efecto Raman, podemos

fijar a Brillouin la misma limitación que tenemos para Raman, y así encontraremos el ancho de banda mínimo con el que cumplimos el balance de potencia y, además, el efecto Raman.

$$P_c = \frac{21 \cdot b \cdot A_e}{g_b \cdot \frac{\Delta\nu_B}{\Delta\nu_L} \cdot L_e} = 0,4166 \text{ W} \frac{21 \cdot 2 \cdot 28,27 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2}{4 \cdot 10^{-11} \text{ m/W} \cdot \frac{20 \text{ MHz}}{\Delta\nu_L} \cdot 10.000 \text{ m}} \quad (135)$$

Aislando $\Delta\nu_L$:

$$\Delta\nu_L > 2,8 \text{ GHz} \quad (136)$$

6) Conclusiones

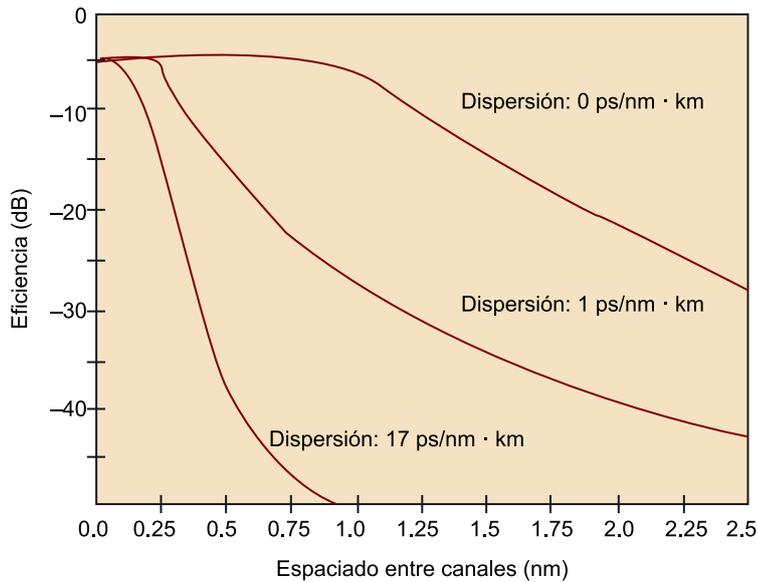
Será necesario que la potencia del transmisor sea como mínimo de 12,88 mW para cumplir el balance de potencia y, en principio, como máximo tendrá que ser de 416,6 mW para cumplir el efecto Raman.

Respecto al ancho de banda, el máximo se sitúa en 100 GHz, que es la separación entre canales. El ensanchamiento por dispersión es bajo y, de este modo, la dispersión no nos limitará el ancho de banda del sistema. Si empleamos un ancho de banda superior a 2,8 GHz, no tendremos problemas con el efecto Brillouin. Para anchos de banda inferiores a 2,8 GHz se tendrá que calcular la potencia crítica de Brillouin, puesto que este efecto nos limitará más que el efecto Raman.

Hay que decir que no tendremos problemas de dispersión: se trata de un sistema monomodo con una longitud no muy elevada y una velocidad binaria muy baja, factores que son propicios para no sufrir la dispersión.

6.3. Ejemplo III

Se quiere diseñar un sistema WDM de una longitud de 70 km, trabajando en la tercera ventana. La fibra óptica que hay que utilizar es monomodo estándar de índice de salto con unas pérdidas de 0,2 dB/km, un diámetro de núcleo de 9 micrómetros, un índice de refracción del núcleo de 1,455 y un índice de refracción del revestimiento de 1,45. Los láseres que se utilizan tienen un ancho de banda de 0,015 nm y se modulan OOK (*on off keying*) NRZ a 10 Mbit/s. ¿Cuántos canales podrá soportar el sistema WDM si queremos una eficiencia del *four wave mixing* (FWM) inferior al 2,5%?

Figura 21. Eficiencia del *four wave mixing*

En este problema, se pide cuál es el número de canales máximo que puede tener el sistema WDM. Básicamente, el número de canales está limitado por las no linealidades: cuantos más canales haya en el sistema WDM, más potencia se está inyectando en la fibra y, por lo tanto, resulta más fácil sufrir no linealidades.

Si hacemos un análisis de los efectos no lineales que pueden afectar al sistema, extraeremos las relaciones que hay entre los diferentes efectos y veremos el procedimiento que se debe seguir para resolver el problema.

Debemos tener en cuenta que el efecto Brillouin es independiente del número de canales. En este sentido, este efecto nos puede limitar en la potencia máxima de cada canal, pero no en el número de canales del sistema.

El efecto *four wave mixing* (FWM) es un efecto no lineal propio de los sistemas WDM, y la no linealidad toma más o menos fuerza en función de la separación frecuencial de los canales. Cuanto más cercanos estén, más eficiencia tendrá la mezcla y, por lo tanto, más fuerte será la no linealidad.

El efecto Raman, en el caso de tener un sistema WDM, debe cumplir el criterio de diseño siguiente:

$$(N \cdot P) [(N - 1) \cdot \Delta f] < 500 \text{ GHz} \cdot W \quad (137)$$

Esta expresión relaciona el número de canales (N), la separación entre canales (Δf) y la potencia máxima por canal (P). Observemos que resolviendo esta expresión podemos obtener el resultado del problema, es decir, el número máximo de canales del sistema WDM, siempre que empleemos la potencia má-

xima por canal (parámetro que está determinado por el efecto Brillouin) y la separación entre canales que cumple la restricción de mantener una eficiencia del *four wave mixing* (FWM) inferior al 2,5%.

Para resumir, a partir de la restricción de eficiencia de FWM encontraremos la separación entre canales; a partir del efecto Brillouin encontraremos la potencia máxima por canal, y a partir del efecto Raman relacionaremos los dos parámetros anteriores para encontrar el número máximo de canales.

1) Efecto Brillouin

El efecto Brillouin en un sistema WDM se calcula como si se tratara de un sistema con una sola portadora, puesto que este efecto es independiente del número de canales.

La fórmula que determina la potencia crítica de este efecto es:

$$P = \frac{21 \cdot b \cdot A_e}{g \cdot L_e} \quad (138)$$

Y para aplicarla habrá que encontrar los parámetros de la ganancia no lineal del sistema (g), del área efectiva (A_e) y de la longitud efectiva (L_e):

$$g = g_b \cdot \frac{\Delta\nu_B}{\Delta\nu_L} = \left\{ \Delta\nu_L = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda_L = 1,873 \text{ GHz} \right\} = 4,271 \cdot 10^{-13} \text{ m/W} \quad (139)$$

$$A_e = \pi \left(\frac{d_e}{2} \right)^2 \simeq \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 = 63,617 \text{ } \mu\text{m}^2 \quad (140)$$

$$L_e = \frac{1}{\alpha} = \left\{ \alpha = \frac{\alpha[\text{dB/km}]}{10 \cdot \log e} = 4,605 \cdot 10^{-2} \text{ km}^{-1} \right\} = 21,7147 \text{ km} \quad (141)$$

Si sustituimos en la fórmula estos parámetros, encontramos la potencia máxima por canal limitada por el efecto Brillouin.

$$P = \frac{21 \cdot b \cdot A_e}{g \cdot L_e} = 0,288 \text{ W} \quad (142)$$

2) *Four wave mixing*

El enunciado especifica $\eta < 2,5\%$. Tendremos que convertir este valor a escala logarítmica para así utilizar la gráfica que nos proporciona el enunciado:

$$10 \log 0,02 = -16 \text{ dB} \quad (143)$$

De la gráfica de eficiencia respecto al espaciado entre canales, y considerando $D = 17$ ps/nm/km (puesto que se trata de una fibra monomodo estándar –SMF– y no de una fibra de dispersión cero –ZDF–), obtenemos el valor de 0,25 nm de espaciado entre canales.

Este valor (0,25 nm), expresado en longitud de onda, tendremos que pasarlo a frecuencia:

$$\Delta\nu_L = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda_L = 31,217 \text{ GHz} \quad (144)$$

3) Efecto Raman

Aplicamos el criterio de diseño del efecto Raman con los parámetros de potencia máxima por canal y separación entre canales obtenidos:

$$(N \cdot P) [(N - 1) \cdot \Delta f] < 500 \text{ GHz} \cdot W \quad (145)$$

$$(N \cdot 0,288) [(N - 1) \cdot 31,217] < 500 \quad (146)$$

$$9N^2 - 9N - 500 < 0 \quad (147)$$

Finalmente, si resolvemos la ecuación de segundo grado obtenemos la limitación de número de canales del sistema WDM:

$$N < 8 \text{ canales} \quad (148)$$

6.4. Ejemplo IV

Disponemos de un enlace WDM operando en tercera ventana y con una separación entre canales de 0,8 nm. El ancho de banda de cada láser una vez modulado es de 0,04 nm. La fibra óptica utilizada es monomodo estándar con un diámetro efectivo del modo de 6 micrómetros, y una atenuación en la tercera ventana de 0,19 dB/km.

a) Calculad la longitud máxima que puede tener este enlace en los casos siguientes:

- Sistema WDM con cuatro canales.
- Sistema WDM con seis canales.

Tened en cuenta que inyectaremos en la fibra la máxima potencia que nos permita el sistema.

b) A partir de los resultados obtenidos en el apartado anterior, extraed conclusiones sobre la relación entre el número de canales y la longitud máxima de un sistema WDM.

a) Hay que notar que no tenemos suficientes datos para calcular la limitación de longitud provocada por la atenuación y la dispersión. Así pues, calculemos la limitación provocada por los efectos no lineales de cuyos datos disponemos. Estos son el efecto Raman y el efecto Brillouin.

1) Sistema WDM con cuatro canales

A partir del criterio de diseño para cumplir el efecto Raman en un sistema WDM, podemos calcular la máxima potencia por canal que inyectaremos en la fibra.

Calculamos primero la separación entre canales en la frecuencia a la que corresponde una separación entre canales de longitud de onda de 0,8 nm.

$$\Delta\nu = \frac{c_0}{\lambda^2} \Delta\lambda = \frac{c_0}{(1.550 \text{ nm})^2} \cdot 0,8 \text{ nm} = 100 \text{ GHz} \quad (149)$$

Por el criterio de diseño, para cumplir el efecto Raman en sistemas WDM:

$$N \cdot P \cdot (N - 1) \Delta f < 500 \text{ GHz} \cdot W \quad (150)$$

$$4 \cdot P \cdot (4 - 1) 100 \text{ GHz} < 500 \text{ GHz} \cdot W \quad (151)$$

$$P < 416,6 \text{ mW} \quad (152)$$

Una vez disponemos de la máxima potencia por canal que podemos inyectar en la fibra, y a partir de la limitación impuesta por el efecto Brillouin, podemos calcular la longitud máxima de fibra del sistema WDM.

El cálculo de la potencia crítica en el efecto Brillouin se lleva a cabo a partir de la expresión siguiente:

$$P_c = \frac{21 \cdot b \cdot A_e}{g \cdot L_e} \quad (153)$$

Cálculo de los parámetros:

Puesto que se trata de una fibra óptica monomodo estándar y, por lo tanto, no mantiene la polarización, entonces $b=2$.

$$A_e = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (3 \mu\text{m})^2 = 28,743 \mu\text{m}^2 \quad (154)$$

**Lectura de la fórmula
(153)**

$$g = g_b \frac{\Delta\nu_b}{\Delta\nu_l}$$

$$\Delta\nu = \frac{c_0}{\lambda^2} \Delta\lambda = \frac{c_0}{(1.550 \text{ nm})^2} \cdot 0,04 \text{ nm} = 5 \text{ GHz} \quad (155)$$

$$g = g_b \frac{\Delta\nu_b}{\Delta\nu_1} = 4 \cdot 10^{-11} \text{ m/W} \cdot \frac{20 \text{ MHz}}{5 \text{ GHz}} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ m/W} \quad (156)$$

A partir de estos parámetros y de la potencia máxima por canal encontrada por el efecto Raman (ahora sustituida como potencia crítica de Brillouin), podemos encontrar la longitud efectiva sin reajustarla según si el enlace es largo o corto.

$$L_e = \frac{21 \cdot b \cdot A_e}{g \cdot P_c} = \frac{21 \cdot 2 \cdot 28,743 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2}{1,6 \cdot 10^{-13} \text{ m/W} \cdot 0,4166 \text{ W}} = 17,815 \text{ km} \quad (157)$$

Ahora deberemos saber cuál es la longitud efectiva, considerando que el enlace es largo, para de este modo tener una referencia para determinar si el enlace es largo o corto.

$$\alpha = \frac{\alpha_{\text{dB/km}}}{10 \log_e} = \frac{0,19}{10 \log_e} = 4,374 \cdot 10^{-2} \text{ km}^{-1} \quad (158)$$

$$L_e = \frac{1}{\alpha} = 22,857 \text{ km} \quad (159)$$

Podemos observar que la longitud máxima se sitúa a 17,815 km y, por lo tanto, es inferior a la longitud efectiva que se considera si el enlace fuera largo (22,857 km). En este caso, nos limita más el efecto Brillouin que el efecto Raman. Con el resultado obtenido, queda claro que si queremos mantener la potencia máxima que nos permite Raman, entonces debemos acortar el enlace.

2) Sistema WDM con seis canales

Siguiendo el mismo procedimiento empleado en el caso anterior (sistema WDM de cuatro canales) del criterio de diseño para cumplir el efecto Raman en un sistema WDM, calculamos la máxima potencia por canal que podemos inyectar en la fibra.

$$N \cdot P \cdot (N - 1) \Delta f < 500 \text{ GHz} \cdot W \quad (160)$$

$$6 \cdot P \cdot (6 - 1) 100 \text{ GHz} < 500 \text{ GHz} \cdot W \quad (161)$$

$$P < 166,6 \text{ mW} \quad (162)$$

Una vez disponemos de la máxima potencia por canal que podemos inyectar en la fibra, a partir de la limitación impuesta por el efecto Brillouin, calculamos la longitud máxima de fibra del sistema WDM.

A partir de los mismos parámetros calculados en el caso anterior y de la potencia máxima por canal encontrada por el efecto Raman (ahora sustituida como potencia crítica de Brillouin), podemos encontrar la longitud efectiva sin reajustarla según si el enlace es largo o corto.

$$L_e = \frac{21 \cdot b \cdot A_e}{g \cdot P_c} = \frac{21 \cdot 2 \cdot 28,743 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2}{1,6 \cdot 10^{-13} \text{ m/W} \cdot 0,1666 \text{ W}} = 44,532 \text{ km} \quad (163)$$

En este caso, la longitud máxima de fibra que puede tener el enlace WDM utilizando la máxima potencia que nos viene limitada por el efecto Raman será de 44,532 km, superior a la longitud efectiva si consideramos que el enlace es largo (22,857 km). Por lo tanto, la respuesta es que no tendremos limitación de longitud máxima debida al efecto Raman o al efecto Brillouin.

b) Conclusiones sobre la relación entre el número de canales y la longitud máxima de un sistema WDM.

- Si el número de canales es bajo, entonces, por el criterio de diseño de Raman en sistemas WDM, podemos inyectar una potencia más alta por canal. En esta situación, la limitación puede venir por el efecto Brillouin.
- Si la potencia es limitada por el efecto Brillouin y queremos continuar inyectando la potencia que Raman nos permite, entonces debemos acortar el enlace.
- Si el número de canales es grande, entonces, por el criterio de diseño de Raman en sistemas WDM, podemos inyectar una potencia por canal baja. Al tener una potencia baja por canal, no tendremos problemas con el efecto Brillouin. Lo que nos limitará la potencia será el efecto Raman.
- A partir de una cierta longitud de fibra en el enlace, la potencia crítica no varía. Esto ocurre cuando la longitud efectiva es la que corresponde a un enlace largo.

Cálculo de la potencia crítica debida al efecto Brillouin en el caso de un enlace largo:

$$P_c = \frac{21 \cdot b \cdot A_e}{g \cdot L_e} = \frac{21 \cdot 2 \cdot 28,743 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2}{1,6 \cdot 10^{-13} \text{ m/W} \cdot 22,857 \text{ m}} = 0,3247 \text{ W} \quad (164)$$

De este resultado, podemos concluir lo siguiente.

- Si la potencia crítica por canal calculado con el criterio de diseño del efecto Raman es menor o igual que 324,7 mW, entonces lo que limita es el efecto Raman y resulta independiente de la longitud.

- Si la potencia crítica por canal calculado con el criterio de diseño del efecto Raman es superior a 324,7 mW, entonces lo que limita es el efecto Brillouin y se deberá acortar el enlace.

6.5. Ejemplo V

Deducid el margen de valores del ancho de banda de la señal inyectada en la fibra que hace que predomine el efecto Brillouin sobre el efecto Raman. Considerad un enlace IM/DD de una sola portadora operando en la tercera ventana.

La potencia crítica del efecto Raman es:

$$P = \frac{16 \cdot b \cdot A_e}{g_r \cdot L_e} \quad (165)$$

Donde g_r es la ganancia de Raman, que vale $7 \cdot 10^{-14}$ m/W.

Por otro lado, la potencia crítica del efecto Brillouin es:

$$P = \frac{21 \cdot b \cdot A_e}{g \cdot L_e} \quad (166)$$

Donde g es la ganancia no lineal del sistema y vale:

$$g = g_B \frac{\Delta\nu_B}{\Delta\nu_L} \quad (167)$$

Donde g_B es la ganancia de Brillouin, que vale $4 \cdot 10^{-11}$ m/W y $\Delta\nu_B$ es el ancho de banda del efecto Brillouin y es de 20 MHz.

Los parámetros del área efectiva (A_e), la longitud efectiva (L_e) y el parámetro de polarización (b) son los mismos en el caso del efecto Raman y del efecto Brillouin.

Si igualamos las expresiones de la potencia crítica de Raman y la de Brillouin, y simplificamos los parámetros que son iguales, nos queda:

$$\frac{16}{g_r} = \frac{21}{g_B \frac{\Delta\nu_B}{\Delta\nu_L}} \quad (168)$$

Aislamos el ancho de banda del láser y obtenemos:

$$\Delta\nu_L = \frac{16 \cdot 4 \cdot 10^{-11} \text{ m/W} \cdot 20 \cdot 10^6 \text{ Hz}}{21 \cdot 7 \cdot 10^{-14} \text{ m/W}} = 8,7 \text{ GHz} \quad (169)$$

El margen de valores del ancho de banda en el que el efecto Brillouin predominará sobre el efecto Raman será $0 < \Delta\nu_L < 8,7$ GHz.

Bibliografía

Agrawal, Govind P. (2010). *Fiber-Optic Communication Systems*. Wiley.

Agrawal, Govind P. (2006). *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press.

Saleh, B. E. A.; Teich, M. C. (2007). *Fundamentals of Photonics*. Wiley.

