

INFORME UIT-R F.2106

Aplicaciones del servicio fijo que utilizan enlaces ópticos en el espacio libre

(Cuestión ITU-R 237/9)

(2007)

Cometido

Este Informe proporciona una respuesta a la Cuestión UIT-R 237/9 sobre enlaces ópticos en el espacio libre para aplicaciones del servicio fijo.

Los siguientes puntos presentan las características de los equipos, las posibles aplicaciones del SF y los aspectos técnicos y de funcionamiento de los sistemas de transmisión óptica en el espacio libre (véanse las Notas 1 y 2).

NOTA 1 – La transmisión en el espacio libre estudiada en este Informe se centra en sistemas para su utilización en exteriores.

NOTA 2 – La conexión óptica en el espacio entre una estación central y terminales móviles/nómadas que sirven como red inalámbrica de área local cae fuera del ámbito de este Informe; sin embargo, se describe un enlace fijo entre estaciones centrales.

Abreviaturas

- CAA: Control de atenuación automático (*automatic attenuation control*)
APD: Fotodiodo de avalancha (*avalanche photo diode*)
FSO: Sistema de transmisión óptica en el espacio libre (*free-space optics*)
FSOL: Enlace óptico en el espacio libre (*free-space optical link*)
DL: Diodo láser (*laser diode*)

Referencias**Recomendaciones UIT-R**

Recomendación UIT-R F.1668 – Objetivos de característica de error para los enlaces inalámbricos fijos digitales utilizados en las conexiones ficticias de referencia y trayectos ficticios de referencia de 27 500 km.

Recomendación UIT-R F.1703 – Objetivos de disponibilidad para enlaces inalámbricos fijos digitales reales utilizados en las conexiones ficticias de referencia y trayectos ficticios de referencia de 27 500 km.

Recomendación UIT-R P.1814 – Métodos de predicción necesarios para diseñar enlaces ópticos terrenales en espacio libre.

Recomendación UIT-R P.1817 – Datos de propagación necesarios para el diseño de enlaces ópticos terrenales en el espacio libre.

Recomendaciones UIT-T

Recomendación UIT-T G.640 – Interfaces compatibles coubicadas longitudinalmente para sistemas ópticos en el espacio libre.

Recomendación UIT-T G.692 – Interfaces ópticas para sistemas multicanales con amplificadores ópticos.

1 Introducción

Recientemente, los enlaces FSO (FSOL) se han convertido en un medio de transporte interesante para aplicaciones fijas de corto alcance. Estos enlaces presentan las siguientes ventajas:

- se dispone de transmisión en banda ancha;
- el equipo de transmisión/recepción es compacto;
- casi no hay necesidad de coordinación para evitar la interferencia entre los FSOL.

Por consiguiente, para ampliar sus aplicaciones actuales y futuras, es necesario considerar los aspectos técnicos y de funcionamiento de los FSOL mediante los análisis teóricos y los métodos experimentales descritos en el presente Informe.

2 Descripción de la configuración del sistema y parámetros básicos

2.1 Explicación de los parámetros

2.1.1 Extremo transmisor

2.1.1.1 Zona de emisión, E_a

La zona de emisión, E_a , es la superficie de la ventana de transmisión expresada en metros cuadrados (m^2).

La zona de emisión es un parámetro utilizado para determinar la clase de seguridad del láser.

2.1.1.2 Potencia de emisión, E_p

La potencia de emisión, E_p , es la potencia transmitida a través de la zona de emisión, E_a , expresada en dBm o en mW. Es uno de los otros parámetros utilizados para determinar la clase de seguridad del láser y se emplea para calcular el margen del enlace. La medición de potencia debe realizarse fuera del FSO y lo más próximo posible a las ventanas de emisión del FSO. Si es posible, la medición debe llevarse a cabo transmitiendo «0» y «1» con igual probabilidad de aparición. La potencia es el valor promediado entre el valor de alto nivel (bit «1») y el valor de bajo nivel (bit «0»).

Por razones de seguridad, es necesario determinar la precisión de la medición de potencia, por ejemplo, $E_p = 10 \text{ dBm} \pm 1 \text{ dB}$.

Igualmente por razones de seguridad, si el terminal tiene un ajuste de divergencia automático, la E_p se define para el mínimo valor de divergencia y, para el terminal con control automático de potencia de transmisión (CAPT), el máximo valor de E_p es el máximo valor de la potencia de emisión.

En el caso de terminales con sistema multihaz, debe indicarse la E_p en cada E_a y el valor total (suma de los haces – mW). El total es la suma de todas las E_p para cada terminal de emisión cuando todos los haces convergen y este parámetro se utiliza por motivos de seguridad. También es necesario indicar la distancia entre dos E_a con la divergencia del haz.

Si los terminales tienen un difusor óptico holográfico para lograr una fuente superampliada, debe indicarse la E_p basada en la E_a fin de proporcionar un elevado nivel de eficiencia en la transmisión por difusión con una zona de difusión controlada y para aumentar la eficiencia de la transmisión con una configuración de clase 1 (según la norma CEI 60825-1 [3]).

2.1.1.3 Divergencia del haz, B_d o θ

La divergencia del haz, B_d , es el máximo valor de los ángulos formados por el eje central del haz correspondiente a la máxima densidad de potencia y la dirección correspondiente a una densidad de potencia -3 dB inferior.

Este valor es importante para determinar la clase de seguridad del láser y calcular el margen del enlace. El valor puede expresarse como semiángulo o ángulo completo, pero en cualquier caso debe indicarse, y la unidad son normalmente miliradianes (mrad). Si se produce divergencia del ajuste, deben indicarse los valores mínimo y máximo.

2.1.1.4 Longitud de onda, W_a o λ

La longitud de onda, W_a o λ , es la longitud de onda central y su anchura total a la mitad del valor máximo (FWHM). El valor de la longitud de onda central también es importante para calcular la clase de seguridad del láser y se expresa en nanómetros (por ejemplo, $\lambda = 849 \pm 2$ nm).

Si hay una transmisión con multiplexión por división de la longitud de onda (WDM), sería más fácil indicar la gama espectral.

2.1.1.5 Clase de seguridad del láser

La clase de seguridad del terminal FSO sigue la referencia normativa CEI 60825 y debe ser controlada por un laboratorio homologado. Para dicho terminal FSO debe preferirse la clase de seguridad 1 ó 1M.

2.1.2 Extremo receptor

2.1.2.1 Zona del receptor, R_a

La zona del receptor, R_a , es la zona de recepción completa o la superficie a través de la ventana del receptor. Las unidades en las que se expresan son metros cuadrados (m^2).

2.1.2.2 Sensibilidad, S_e

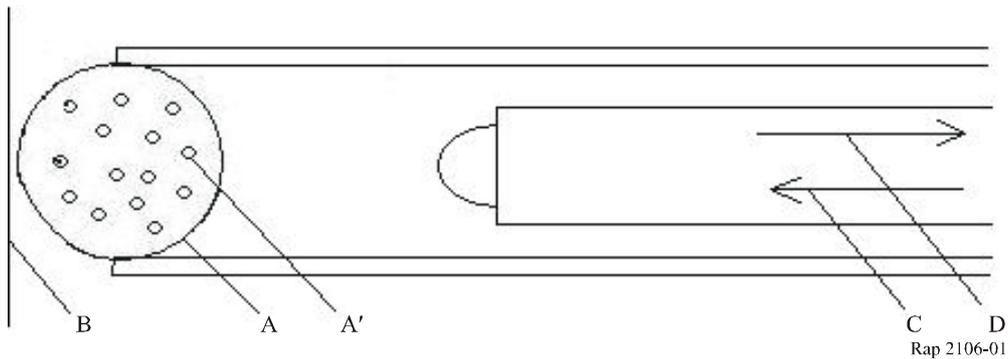
La sensibilidad, S_e , es el mínimo nivel óptico con una calidad de transmisión de datos considerada (por ejemplo, la BER debe ser mejor que 10^{-6} ; es decir $BER \leq 10^{-6}$).

La sensibilidad debe expresarse en dBm y la medición debe realizarse próxima a la ventana del receptor FSO.

Si el terminal tiene ventanas multirreceptor, debe indicarse el valor de S_e en cada R_a y la sensibilidad total.

Si el terminal tiene un sistema de recepción constituido por microesferas dopadas, A, por un elemento dopante, A', de acuerdo con la longitud de onda de resonancia del haz incidente, B, constituyendo una interfaz con el transmisor de láser, C, con una longitud de onda definitiva y una potencia ajustable que ofrece una contribución de energía en el enlace a la frecuencia de resonancia de los elementos dopantes contenido en las microesferas, la sensibilidad, S_e , del terminal, D, será la sensibilidad de dicho sistema con la misma calidad de transmisión de datos considerada (Fig. 1).

FIGURA 1
Terminal con microesfera



2.1.2.3 Sensibilidad de saturación, S_s

La sensibilidad de saturación, S_s , es el máximo nivel óptico con una calidad de transmisión de datos considerada (por ejemplo, la BER debe ser mejor que 10^{-6} ; es decir, $BER \leq 10^{-6}$), con o sin control de atenuación automático (CAA).

La unidad en la que debe expresarse son dBm y la medición debe realizarse próxima a las ventanas del receptor FSO.

Si el terminal tiene ventanas multirreceptor, debe indicarse el valor de S_e en cada R_a y la sensibilidad total.

La diferencia entre la sensibilidad de saturación (con CAA en caso de que haya) y la sensibilidad proporciona la gama dinámica.

2.1.2.4 Campo de visión, F_v

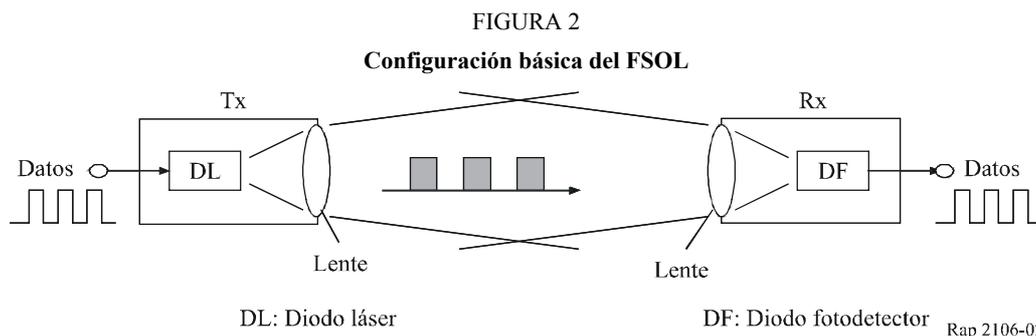
El campo de visión, F_v , es el ángulo que forma el eje central y el valor del ángulo de detección a -3 dB. El valor puede expresarse como semiángulo o ángulo completo, pero en cualquier caso debe indicarse y la unidad en la que se expresa es el milirradián (mrad).

2.1.2.5 Pérdidas del sistema, S_l

Este elemento se utilizará como una indicación y no se emplea para calcular la clase de seguridad del láser y el margen del enlace debido a los puntos de medición de emisión y recepción. La unidad en la que debe expresarse son dB.

2.2 Configuración del sistema

La configuración básica de un FSOL para aplicaciones del SF se representa en la Fig. 2.



En muchos FSOL, la función de conversión eléctrica/óptica (E/O) u óptica/eléctrica (O/E) se lleva a cabo en el DL del Tx o en el DF del Rx, respectivamente. Últimamente, algunos sistemas han adoptado la técnica WDM en la cual puede acomodarse más de una portadora óptica en un par de transmisores y receptores para aumentar la capacidad del enlace [1] [2]. Sin embargo, es necesario seguir desarrollando los sistemas WDM, en particular para la tecnología de filtros de derivación en el extremo receptor desde el punto de vista de una utilización económica.

El equipo utiliza la modulación de un haz de láser para intercambiar datos binarios en ambos sentidos mediante una pareja de transmisor/receptor (diodo láser/APD o diodo PIN) en cada extremo. El equipo se utiliza para enlaces bilaterales punto a punto y con visibilidad directa.

Cada equipo consta de varios módulos:

- Para la transmisión:
 - a) la interfaz tributaria: eléctrica u óptica para enviar y recibir datos digitales;
 - b) el módulo de conversión E/O (si hay interfaz óptica);
 - c) el filtrado y la amplificación de la señal digital eléctrica;
 - d) el módulo de transmisión óptica que contiene el láser.
- Para la recepción:
 - a) el módulo de recepción óptica que contiene el diodo;
 - b) el filtrado y la amplificación de la señal digital eléctrica;
 - c) el módulo de conversión O/E (si hay interfaz óptica);
 - d) la interfaz tributaria: eléctrica u óptica para enviar y recibir datos digitales.

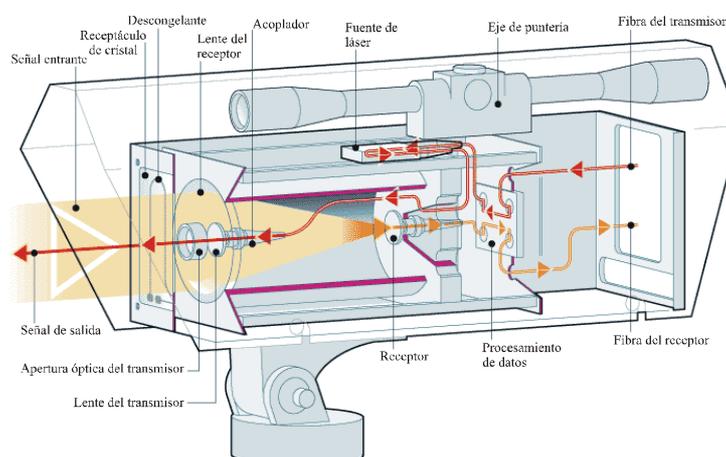
A veces el equipo incorpora un software de gestión que permite configurar el enlace y obtener información cualitativa y cuantitativa de los distintos módulos.

Dependiendo de los fabricantes pueden implementarse algunas funcionalidades adicionales, tales como:

- un sistema de seguimiento, CAPT, CAA;
- un enlace radioeléctrico de asistencia, con velocidad limitada, si se produce una interrupción del enlace del láser.

La Fig. 3 representa un ejemplo de estructura del equipo FSO.

FIGURA 3
Ejemplo de terminal FSO (de acuerdo con el acceso óptico, San Diego, EE.UU.)



2.3 Parámetros básicos del sistema

Los principales parámetros que deben tenerse en cuenta en la definición de los enlaces ópticos son los siguientes:

Alcance: Varía de acuerdo con el equipo desde unas pocas decenas de metros a varios kilómetros. Algunos fabricantes proporcionan un máximo alcance, otros especifican el alcance típico para diversas condiciones meteorológicas y otros finalmente proponen un alcance «recomendado», en el que se integra un margen comparado con el máximo valor. Estos valores deben tomarse como órdenes de magnitud y no como valores absolutos.

Seguridad: Un factor importante que debe tenerse en cuenta es la categoría del láser del equipo porque según sus condiciones pueden aplicarse métodos más o menos sencillos para la instalación y mantenimiento de un enlace FSO. Los parámetros que deben tenerse en cuenta al definir la categoría del láser son la longitud de onda de la señal, las potencias implicadas y la forma del haz. Conviene elegir un terminal de clase 1 ó 1M basado en la referencia normativa CEI 60825-1.

Velocidad de transmisión de datos y tipo de aplicación recomendada: Muchos sistemas son transparentes a la velocidad de transmisión de datos y al protocolo; para una gama de velocidades de transmisión de datos a menudo esto es relativamente importante. En ese caso las aplicaciones dependen de la máxima capacidad que puede transmitir el sistema y pertenecen invariablemente al mundo de las telecomunicaciones o del procesamiento de datos. Un sistema transparente hasta 200 Mbit/s podrá transmitir, por ejemplo, señales STM-1, ATM, FDDI o Fast Ethernet. Para una velocidad de transmisión de datos, una interfaz y una utilización determinadas se especifican otros terminales como, por ejemplo, el E1 (2,048 Mbit/s) o datos Ethernet (10 Mbit/s).

Frecuencias/longitudes de onda utilizadas para el FSOL: Existen dos gamas principales de frecuencias/longitud de onda ampliamente utilizadas para aplicaciones FSOL: la gama 230-200 THz/1 300-1 500 nm y la gama 375-385 THz/780-800 nm. Esas gamas presentan ventajas comparadas con otras, en el sentido de que la absorción atmosférica en el espacio libre es bastante pequeña. Además, en los sistemas de fibra óptica, las características de transmisión presentan tan buen comportamiento en estas gamas de longitud de onda que desde el punto de vista económico es interesante utilizar dispositivos luminosos de semiconductores. Se ha desarrollado una tecnología de control preciso para la longitud de onda, en particular en torno a la gama de 1 500 nm, donde la técnica WDM se considera actualmente. A este respecto, la Comisión de Estudio 15 del UIT-T ha llevado a cabo estudios sobre disposiciones de longitud de onda para transmisiones por fibra óptica. Desde el punto de vista de la transmitancia atmosférica, también es conveniente una gama de longitudes de onda comprendidas entre 2 000 y 2 200 nm ya que los efectos de la dispersión por aerosoles y la absorción molecular son mínimos en esta gama, en particular en torno a 2 200 nm [10] [11]. Esta gama presenta otra ventaja ya que es menos sensible al curvado del haz óptico causado por la variación de la temperatura atmosférica (véase el § 7.1). Por otro lado, aún no se dispone de dispositivos luminosos económicos para la generación y detección de señales en la gama 2 000-2 200 nm. La Comisión de Estudio 3 del UIT-R (Grupos de Trabajo 3J y 2M) ha estudiado las características de la propagación óptica en el espacio libre para una amplia gama de frecuencias ópticas incluidos los enlaces por satélite y terrenales (véase el § 3).

Potencia de transmisión del diodo láser: La potencia de transmisión del diodo láser (DL) utilizada por los FSOL es actualmente del orden de 10 mW. Por lo tanto, el diseño del enlace discutido en el punto anterior se basa únicamente en este valor. Sin embargo, los desarrollos tecnológicos lograrán dispositivos ópticos con una capacidad mucho más elevada lo que puede ampliar el alcance y las aplicaciones de los FSOL en un próximo futuro.

También deben tenerse en cuenta los siguientes parámetros secundarios a la hora de elegir un sistema:

- la longitud de onda a la que funciona el enlace óptico: este parámetro tiene repercusiones sobre la clase de seguridad del terminal;
- el tipo y el número de transmisores y/o receptores ópticos, que tiene influencia en el margen del enlace;
- un proceso sencillo en las acciones de realización y mantenimiento;
- un software de supervisión sencillo y fácil de utilizar que permita la gestión de los dos (o varios) terminales (o de varios enlaces) desde un solo emplazamiento (control remoto);
- y el coste del sistema.

3 Características de propagación en el espacio libre relativas al diseño del enlace

Este punto proporciona las características de propagación en el espacio libre para los FSOL basadas en los resultados de los estudios que figuran en la Serie P de las Recomendaciones UIT-R. Para obtener una información más detallada sobre el material contenido en este punto deben consultarse las Recomendaciones pertinentes de la Serie P (Recomendaciones UIT-R P.1814 y P.1817).

3.1 Propagación en condiciones de cielo despejado

En la propagación de onda óptica, aparece la atenuación atmosférica además de la llamada atenuación en el espacio libre incluso en condiciones de tiempo despejado. Esta atenuación, L_{atm} , está causada por la dispersión de Rayleigh y/o la absorción molecular, cuyo efecto depende en gran medida de la longitud de onda.

Además, la potencia recibida fluctúa debido a la turbulencia del gradiente de temperatura en la atmósfera, lo que produce una curvatura del haz, un movimiento del haz puntual o un centelleo en el trayecto de propagación de la onda óptica.

Normalmente, el efecto de la L_{atm} no es tan acusado en las gamas de longitud de onda mencionadas en el § 2.3 (frecuencia/longitud de onda para FSOL) en el caso de enlaces más cortos de 1 km. La interrupción del enlace causada por estos fenómenos puede reducirse fácilmente ajustando la divergencia del haz óptico en el extremo transmisor de manera que el diámetro del haz puntual en el extremo receptor sea de un cierto tamaño; por ejemplo, hasta varios metros.

Otra manera de mejorar la disponibilidad del enlace contra los efectos de la propagación es adoptar un esquema de retransmisión de la señal y/o corrección de errores en recepción en la capa eléctrica.

3.2 Efecto de la niebla

3.2.1 Estimación de la atenuación debida a la niebla utilizando la visibilidad atmosférica

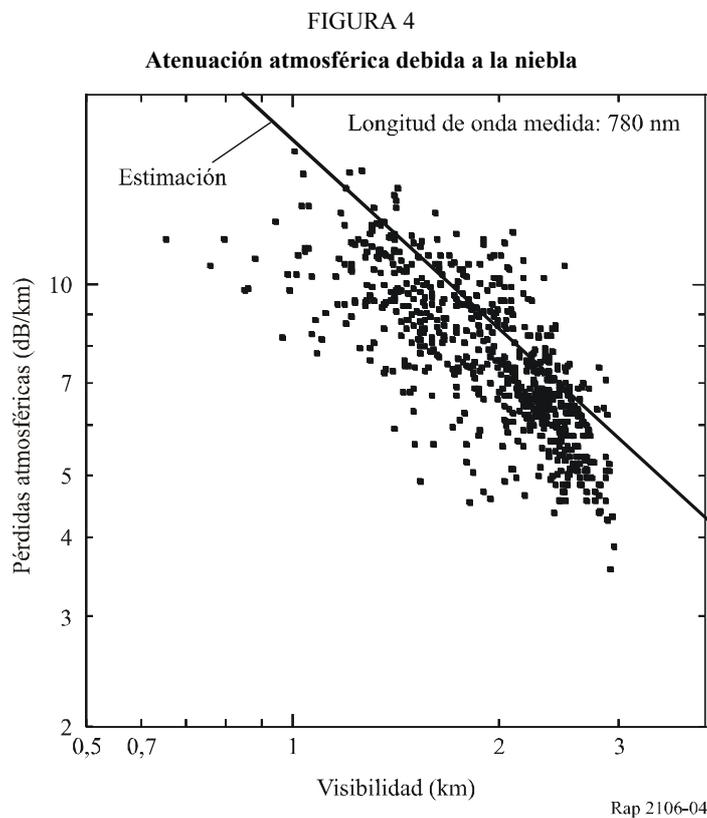
La atenuación debida a la niebla está causada por la dispersión Mie [4], que depende del número de partículas (densidad de la niebla). Generalmente es difícil medir directamente la densidad de la niebla u obtener sus datos estadísticos. El efecto de la atenuación debida a la niebla, Att_{niebla} (dB/km) puede relacionarse con la visibilidad atmosférica, V (km), definida como la máxima distancia a la que puede reconocerse un objeto negro en el cielo [5] [6]. Más específicamente, la visibilidad se define a efectos meteorológicos. Se caracteriza por la transparencia de la atmósfera estimada por un observador humano. Se mide de acuerdo con la gama óptica meteorológica y utilizando un transmisómetro o un difusómetro.

En los casos actuales, la medición de la visibilidad, V , viene dada por la distancia a la que la potencia óptica transmitida cae a ϵ veces su valor original. En los textos, figuran los dos siguientes valores de ϵ : $\epsilon = 0,02$ o $\epsilon = 0,05$.

La relación entre Att_{niebla} y V puede expresarse mediante la siguiente ecuación que puede aplicarse independientemente del tipo de niebla y de la longitud de onda óptica dentro de la gama de V inferior a 3 km.

$$Att_{niebla} = 10\log_{10}(\epsilon)/V \quad (1)$$

Por consiguiente, la atenuación de las ondas ópticas debida a la niebla puede estimarse utilizando estadísticas de la visibilidad. El método de predicción anterior basado en la ecuación (1) ha sido demostrado y se ha tenido en cuenta en el diseño del enlace [5] [7]. La Fig. 4 ilustra la relación entre Att_{niebla} y V para los datos medidos [7].



3.2.2 Análisis detallado de la atenuación por aerosoles (niebla)

En este punto figura un análisis más detallado para los casos en que se conoce el tipo de niebla.

La atenuación atmosférica está causada por un efecto aditivo de absorción y dispersión de la luz infrarroja por los aerosoles y las moléculas gaseosas presentes en la atmósfera. La transmitancia en función de la distancia viene dada por la relación de Beer Lambert:

$$\tau(\lambda, d) = \frac{P(\lambda, d)}{P(\lambda, 0)} = \exp[-\sigma(\lambda)d] \quad (2)$$

donde:

- $\tau(\lambda, d)$: transmitancia a la distancia d del transmisor
- $P(\lambda, d)$: potencia transmitida a la distancia d
- $P(\lambda, 0)$: potencia transmitida
- $\sigma(\lambda)$: atenuación específica o coeficiente de extinción por unidad de longitud.

La atenuación debida a la niebla en un enlace de d (km) está relacionada con la transmitancia mediante la siguiente expresión:

$$Att_{niebla, d} = 10 \log_{10}(1/\tau(\lambda, d)) \quad \text{dB} \quad (3)$$

El coeficiente de extinción $\sigma(\lambda)$ es la suma de 4 términos:

$$\sigma(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (4)$$

donde:

- α_m : coeficiente de absorción molecular (N_2 , O_2 , H_2 , HO , CO_2 , O_3 , ...);
- α_a : coeficiente de absorción por aerosoles (pequeñas partículas sólidas o líquidas presenten en la atmósfera (hielo, polvo, humo, ...));
- β_m : coeficiente de dispersión de Rayleigh resultante de la interacción de la onda con las partículas de un tamaño menor que el de la longitud de onda;
- β_a : coeficiente de dispersión de Mie. Aparece cuando las partículas son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda transmitida.

La absorción domina la gama infrarroja y la dispersión domina las gamas visible y ultravioleta. Básicamente, la atenuación atmosférica (función de la longitud de onda) es inversamente proporcional a la visibilidad, que es un parámetro que caracteriza la opacidad atmosférica en presencia de niebla. Los bajos valores de los coeficientes de absorción molecular y por aerosoles así como el coeficiente de dispersión de Rayleigh y el coeficiente de extinción pueden expresarse mediante las siguientes relaciones Al Naboulsi y Al:

Niebla de advección generada cuando una masa de aire caliente y húmedo fluye sobre una superficie más fría:

$$\sigma(\lambda)_{niebla, adv} = \frac{0,11478\lambda + 3,8367}{V} \quad (5)$$

Niebla de radiación generada por un enfriamiento radiativo de una masa de aire durante la radiación nocturna cuando las condiciones meteorológicas son favorables:

$$\sigma(\lambda)_{niebla,rad} = \frac{0,18126\lambda^2 + 0,13709\lambda + 3,8367}{V} \quad (6)$$

siendo:

λ : longitud de onda FSO (μm)
 V : visibilidad (km).

NOTA 1 – Estas relaciones se han calculado para una longitud de onda entre 690 y 1 550 nm y una visibilidad entre 50 y 1 000 m, una atenuación debida a la niebla para una radiación láser y dos tipos de niebla disponibles en FASCOD, por advección y por radiación. Estas dos relaciones son únicamente válidas para una distancia comprendida entre 50 m y 1 000 m y corresponde al usuario elegir la relación que corresponda al tipo de niebla.

3.3 Efecto de la lluvia

En el caso de lluvia, la atenuación viene causada por la dispersión geométrica debida a las gotas de lluvia. Independientemente de la longitud de onda, esta atenuación $Attlluvia$ (dB/km) está relacionada teóricamente con la distribución del tamaño de gotas de lluvia, fI , mediante la siguiente expresión:

$$Attlluvia = 27,29 \times 10^5 \cdot \int_0^{\infty} r^2 \cdot fI \, dr \quad (7)$$

donde:

r : diámetro de las gotas de lluvia (m)

Para un cierto emplazamiento y una distancia del enlace, puede obtenerse fI mediante los datos estadísticos de la intensidad de lluvia (en muchos casos, la intensidad en una hora R (mm/h)), como sigue:

$$fI = B \exp(C R^k r) \quad (8)$$

A continuación figuran ejemplos de los parámetros utilizados en la ecuación (8) de acuerdo con las estadísticas recopiladas en Japón:

Ejemplo (basado en el modelo de Marshall y Palmer); $B = 0,16$, $C = -82$, y $k = -0,21$.

Entonces, el valor de $Attlluvia$ puede expresarse generalmente en función de la intensidad de precipitación R (mm/h) utilizando las ecuaciones (7) y (8).

$$Attlluvia = \alpha * R^\beta \quad (9)$$

La intensidad de lluvia es el parámetro fundamental utilizado para describir localmente la lluvia. Los parámetros α y β se obtendrán de acuerdo con el emplazamiento (véase el Cuadro 1). Los parámetros obtenidos en Francia son coherentes con los que figuran en la Recomendación UIT-R P.1814.

CUADRO 1

**Ejemplo de los parámetros utilizados para calcular
la atenuación debida a la lluvia**

Emplazamiento	α	β
Japón	1,58	0,63
Francia	1,076	0,67

El método de predicción anterior, que es fundamentalmente similar al utilizado para la propagación radioeléctrica en la gama de ondas milimétrica [9] ha demostrado ser una buena estimación en la propagación de ondas ópticas [5] [7] [15].

La medición de la intensidad de lluvia se realiza directamente mediante pluviómetros o radares meteorológicos. Conociendo el margen del enlace deducido a partir del balance del enlace de potencia óptica, puede obtenerse la probabilidad de interrupción del enlace debida a la lluvia por dicotomía. A continuación figura un ejemplo de cálculo utilizando los parámetros medidos en Francia:

Ejemplo:

$$R = 18 \text{ mm/h}$$

$$Att_{lluvia} = 1,076 \times 18^{0,67} = 7,46 \text{ dB/km}$$

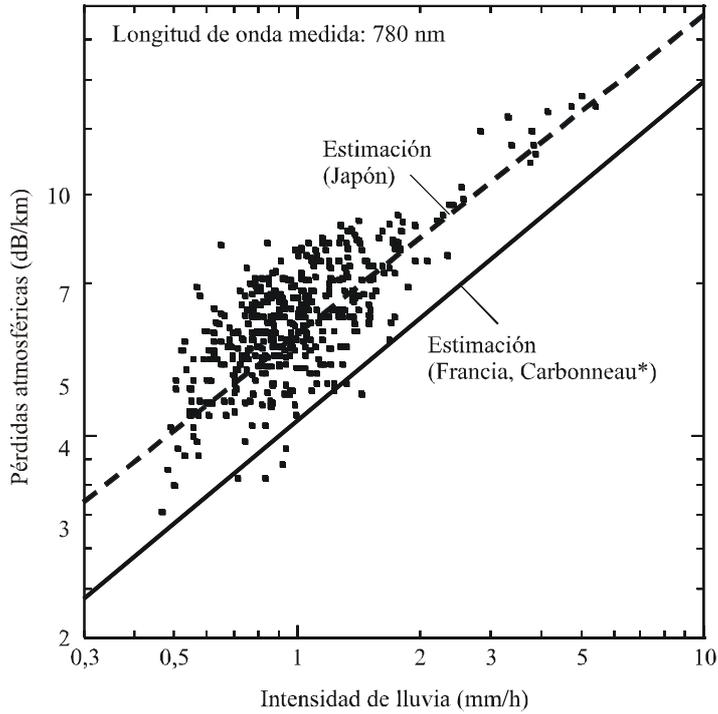
$$Att_{lluvia} = 7 \text{ dB/km.}$$

Las Figs. 5a) y 5b) ilustran las relaciones entre el valor de Att_{lluvia} obtenido utilizando los parámetros del Cuadro 1 y el valor de R para los datos medidos en Japón [7]. Puede observarse que en la región de fuerte intensidad de lluvia, la estimación basada en la Recomendación UIT-R P.1814 también presenta una buena aproximación con los datos medidos obtenidos en Japón.

FIGURA 5

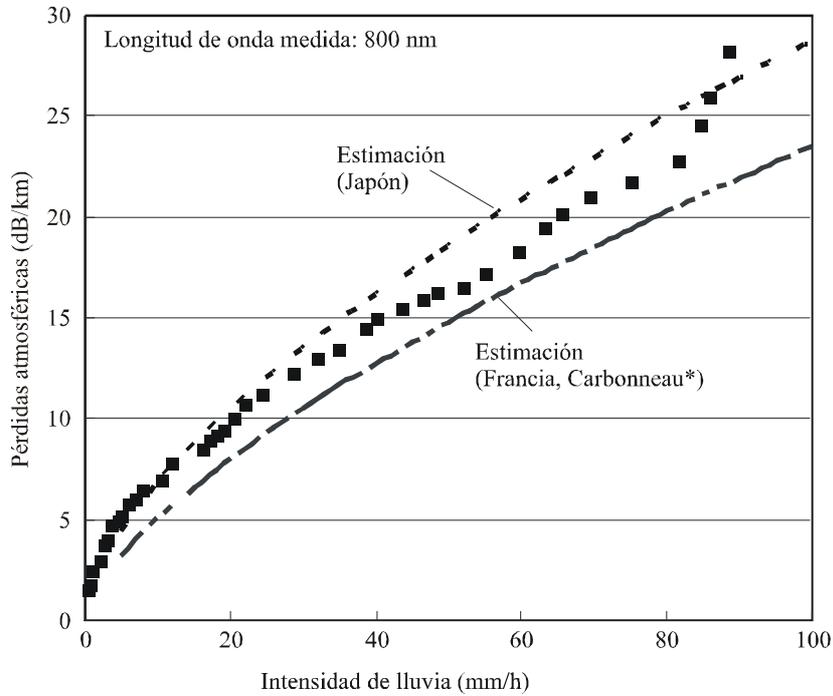
Atenuación atmosférica debida a la lluvia

a) Ejemplo 1



* Esta estimación es coherente con la Recomendación UIT-R P.1814

b) Ejemplo 2



* Esta estimación es coherente con la Recomendación UIT-R P.1814

3.4 Atenuación debida a la nieve

La atenuación debida a la nieve es función de la longitud de onda, λ_{nm} , y de la intensidad de precipitación S (mm/h) de acuerdo con las siguientes relaciones:

- Nieve húmeda (altitud < 500 m):

$$Att_{nieve} = (0,0001023 * \lambda_{nm} + 3,7855466) * S^{0,72} \quad \text{dB/km} \quad (10)$$

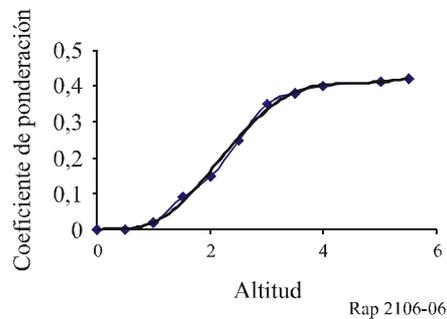
- Nieve seca (altitud ≥ 500 m)

$$Att_{nieve} = (0,0000542 * \lambda_{nm} + 5,4958776) * S^{1,38} \quad \text{dB/km} \quad (11)$$

La intensidad de nieve, S , es el parámetro fundamental utilizado para describir localmente la nieve. Su medición se lleva a cabo en la estación meteorológica.

Las características de la precipitación de nieve se obtienen a partir de las de precipitación de lluvia en el sistema de función de altitud. Se aplica un coeficiente de ponderación, función de la altitud (km), a la intensidad de lluvia, R_p , rebasada durante un determinado porcentaje, p , del año medio en cualquier emplazamiento (Fig. 6). Conociendo el margen del enlace deducido del balance del enlace de potencia óptica puede obtenerse por dicotomía la probabilidad de interrupción del enlace debida a la nieve.

FIGURA 6
Coeficiente de ponderación nieve/lluvia
en función de la altitud



Ejemplo:

$$\text{Altitud} = 147 \text{ m}, \lambda = 850 \text{ nm}, S = 40 \text{ mm/h}$$

$$Att_{nieve} = ((0,0001023 \times 850) + 3,7855466) \times 40^{0,72} = 55,14 \text{ dB/km}$$

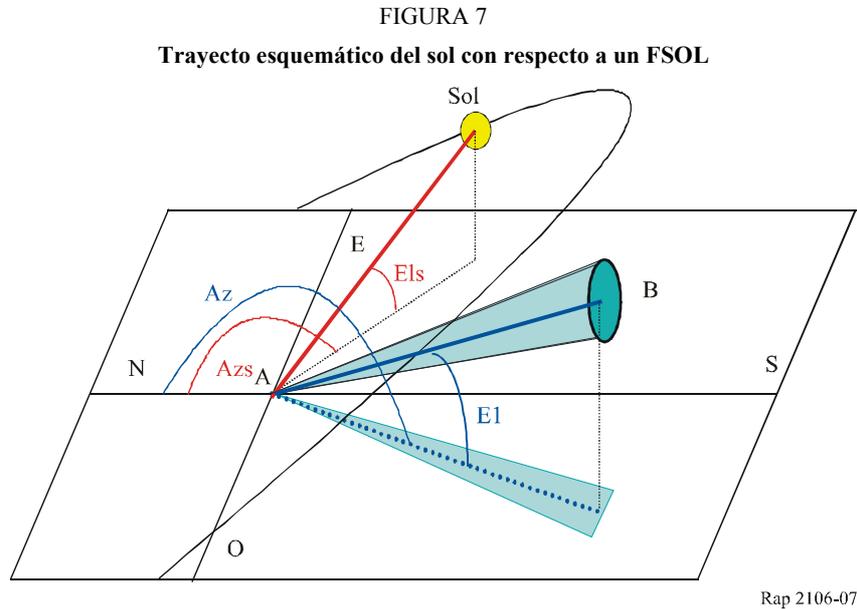
$$Att_{nieve} = 55 \text{ dB/km.}$$

3.5 Atenuación debida a la luz ambiente

Se produce conjunción solar cuando el sol o una imagen reflejada del mismo se encuentra en el campo de visión instantáneo de un receptor óptico, F_v , o cerca de él. El receptor generalmente es al menos tan grande como la divergencia de transmisión. En este caso se calculará la probabilidad de que la posición del sol sea paralela al enlace óptico y la potencia solar que penetra dentro del receptor sea mayor de la potencia recibida del transmisor.

3.5.1 Trayectoria solar

La Fig. 7 representa esquemáticamente los aspectos geométricos del trayecto del sol en el cielo con respecto a un FSOL (A es el receptor y B el transmisor).



Los diferentes parámetros del sol (altura, acimut) se deducen para cada día del año, y para cada hora, minutos y segundos a partir de su declinación y ascensión recta.

3.5.2 Potencia solar en el receptor

La potencia radiada por el sol (W/m^2) se define mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia_radiada} = 1200 * \cos\left(\frac{\pi}{2} - \text{Elevación}_{\text{radian}}\right) \quad (12)$$

donde:

Elevación_{radian}: altura del sol.

La potencia que penetra dentro del receptor viene dada por la siguiente ecuación:

$$P_{\text{solar}} = F_{\text{solar}} * \text{Potencia_radiada} * \text{Superficie de captura} * \text{Anchura de banda}_{\text{receptor(nm)}} / 100 \quad (13)$$

donde:

F_{solar} : potencia espectral solar en función de la longitud de onda

Superficie de captura: superficie de captura del receptor

Anchura de banda_{receptor(nm)}: anchura de banda del receptor.

3.6 Efectos del centelleo

Bajo la influencia de la turbulencia térmica producida en el medio de propagación cabe esperar la formación de células aleatorias, de tamaño variable (10 cm – 1 km) y de diferente temperatura. Estas diversas células tienen índices de refracción distintos que provocan dispersión, trayectos múltiples y variaciones en el ángulo de llegada: la señal recibida fluctúa rápidamente en frecuencias

comprendidas entre 0,01 y 200 Hz. El frente de onda varía de forma similar provocando el enfoque y desenfoque del haz. Tales fluctuaciones de la señal se denominan centelleos. La amplitud y la frecuencia del centelleo depende del tamaño de la célula comparado con el diámetro del haz. Cuando las heterogeneidades son grandes comparadas con la sección transversal del haz, éste se desvía y cuando dichas heterogeneidades son pequeñas el haz se ensancha.

El efecto del centelleo troposférico generalmente se estudia a partir del logaritmo de la amplitud χ (dB) de la señal observada («log-amplitud») (amplitud logarítmica), que se define como la relación en decibelios entre su amplitud instantánea y su valor medio. La intensidad y la velocidad de las fluctuaciones (frecuencia del centelleo) aumentan con la frecuencia de la onda. Para una onda plana, una turbulencia débil y un receptor específico, la varianza del centelleo σ_{χ^2} (dB²) puede expresarse mediante la siguiente relación:

$$\sigma_x^2 = 23,17 * k^{7/6} * C_n^2 * L^{11/6} \quad (14)$$

siendo:

k (m⁻¹): número de onda $\frac{2\pi}{\lambda}$

L : longitud del enlace (m)

C_n^2 (m^{-2/3}): parámetro estructural del índice de refracción que representa la intensidad de turbulencia. Es función de la rugosidad del terreno, de la radiación solar, de la humedad y del albedo terrenal.

La amplitud cresta a cresta del centelleo es de $4\sigma_{\chi}$ y la atenuación que provoca el centelleo es $2\sigma_{\chi}$. En el caso de fuertes turbulencias, se observa una saturación de la varianza que viene dada por la relación anterior [13]. Cabe señalar que el parámetro C_n^2 no tiene el mismo valor con longitudes de onda milimétricas que con longitudes de onda ópticas [14]. Las ondas milimétricas son especialmente sensibles a las fluctuaciones de humedad mientras que en las ondas ópticas el índice de refracción es primordialmente una función de la temperatura (la contribución del vapor de agua es despreciable). Con ondas milimétricas se obtiene un valor de C_n^2 de aproximadamente $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ que es una turbulencia media (en general, en las ondas milimétricas los valores de C_n^2 se encuentran entre 10^{-14} y 10^{-12}) y en las ondas ópticas el valor de C_n^2 es de $2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$ aproximadamente, que es una turbulencia débil (en general, en las ondas ópticas el valor de C_n^2 oscila entre 10^{-16} y $<10^{-13}$) [13].

3.7 Otros factores

En propagación en exteriores, los FSOL apenas producen ruido de fondo. Sin embargo, pueden verse interrumpidos por los rayos solares cuando éstos atraviesan el haz de recepción del FSOL. En el caso en que el rayo solar intersecte el eje principal del haz de recepción, el efecto térmico condensado de la lente puede llegar a ser tan significativo que destruya el receptor. Debe seleccionarse la dirección de enlace óptico de tal manera que se evite la intersección con el rayo del Sol.

4 Aplicaciones en el servicio fijo

4.1 Características generales

Los FSOL presentan las siguientes ventajas:

- anchura de banda amplia o elevada velocidad de transmisión de datos;
- equipo pequeño y sencillo;
- funcionamiento sin necesidad de licencia;
- coste ventajoso;
- instalación rápida y sencilla;
- rápida reutilización y reubicación del enlace.

Para algunas aplicaciones específicas, los FSOL ofrecen varias ventajas adicionales a las que presenta un enlace fijo tradicional o los basados en fibra óptica. A continuación figuran algunos ejemplos de posibles aplicaciones:

- un enlace para un evento especial;
- un enlace temporal: instalación rápida utilizada durante un tiempo limitado a la espera del establecimiento de un enlace tradicional definitivo;
- un enlace de emergencia: instalación de un enlace de emergencia en caso de interrupción de un enlace;
- enlace entre emplazamientos, red independiente (PDH, SDH, ATM, Ethernet 10/100/1 000);
- cierre de un anillo óptico;
- enlace de soporte;
- red densa;
- infraestructura móvil; por ejemplo, enlace de nanocélulas o picocélulas GSM o IMT-2000.

Un FSOL presenta los siguientes inconvenientes:

- disponibilidad relacionada con la distancia;
- condición de visibilidad directa.

Por otro lado, la transmisión de onda óptica en el espacio libre debe superar algunos problemas debidos a la propagación, como se indica en el § 3.

4.2 Ejemplos de aplicación básica

Aprovechando las ventajas, las aplicaciones típicas de los FSOL se llevan a cabo para distancias limitadas. Este punto presenta ejemplos de enlace de conexión de red de área local (LAN) entre edificios y una conexión para la extensión de infraestructura móvil, como se representa en las Figs. 8 y 9.

FIGURA 8
FSOL que conecta LAN instaladas en edificios separados

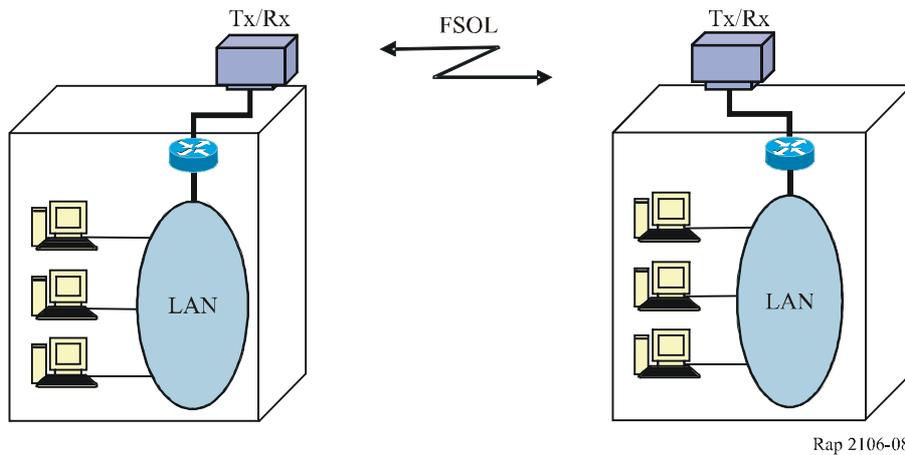
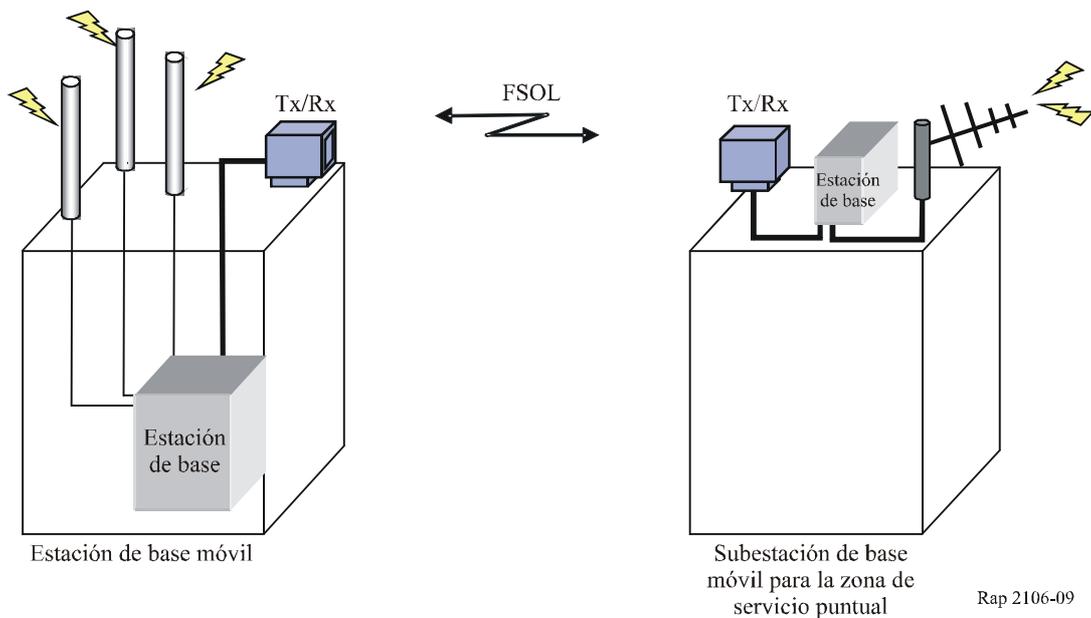


FIGURA 9
FSOL para ampliar la infraestructura móvil



4.3 Ejemplos reales de instalación

Este punto proporciona un ejemplo de instalación de FSOL que constituye una solución de red local de banda ancha junto con un sistema de fibras ópticas.

La Fig. 9 ilustra la configuración de una red de escuelas destinada al acceso a Internet a alta velocidad, utilizando FSOL en combinación con sistemas de fibra óptica. Esta infraestructura de red de banda ancha ha sido instalada en muchas escuelas utilizando varios medios de transmisión que van desde el satélite a la fibra óptica pasando por el acceso inalámbrico fijo a los FSOL. En Japón, los FSOL se utilizan en enlaces para más de 100 escuelas.

Existen casos en que un edificio se emplea como instalación de retransmisión a fin de proporcionar enlaces ampliados a más de una escuela. Esta conexión se realiza fácilmente utilizando la misma señal de frecuencia/longitud de onda. Los parámetros del sistema para el FSOL representado en la Fig. 10 aparecen en el Cuadro 2.

CUADRO 2

Parámetros del FSOL

Máxima longitud del enlace (km)	Aproximadamente 2 ⁽¹⁾
Capacidad de transmisión (Mbit/s)	300
Margen de atenuación (dB)	20
Dispositivo óptico (gama de longitudes de onda)	Diodo láser/Si-APD (banda de 0,8 μm)
Interfaz del cable	Fibra óptica de 1,3 μm

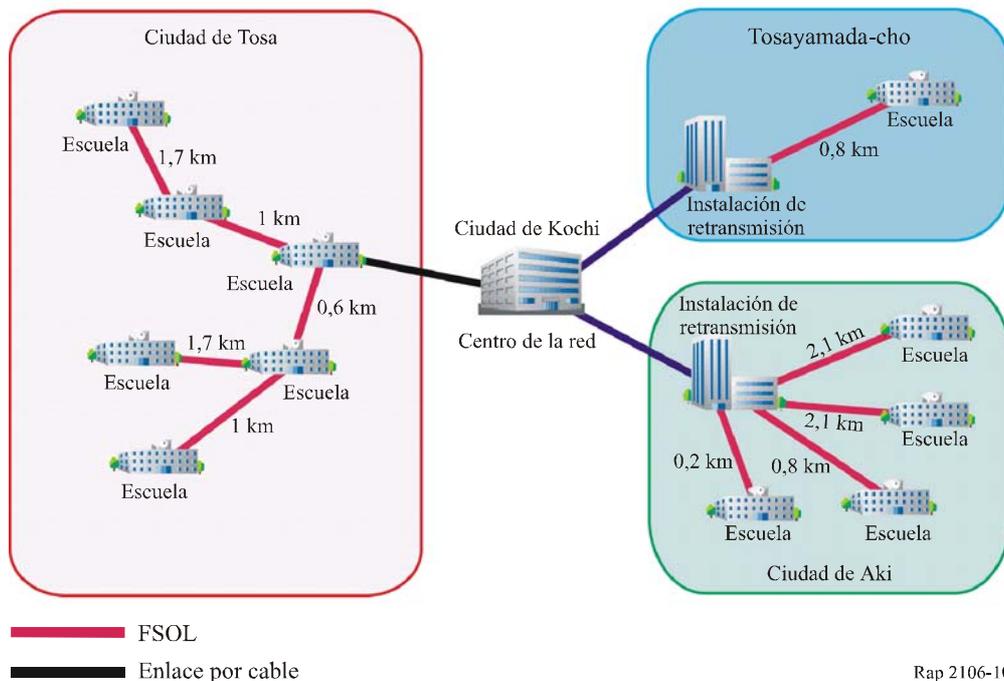
⁽¹⁾ Disponibilidad del enlace superior al 99%

APD: Fotodiodo de avalancha

La disponibilidad del enlace del FSOL se diseña basándose en los datos estadísticos sobre visibilidad recopilados por la autoridad meteorológica local (véase el § 3.2.1).

FIGURA 10

Ejemplo de conexión de escuelas mediante una red de banda ancha



5 Consideraciones sobre el diseño del enlace

5.1 Margen del enlace

Uno de los elementos importantes que deben conocerse en la transmisión de FSO es el margen del enlace del láser. Para utilizar los modelos de predicción, los parámetros necesarios de los equipos son (lista no exhaustiva):

- la potencia de transmisión;
- la sensibilidad del receptor;
- la zona de captura del receptor;
- la divergencia del haz de transmisión.

El margen del enlace óptico es la potencia disponible por encima de la sensibilidad del receptor y queda definido por la siguiente relación:

$$M_{enlace} = E_p + |S_s| - Att_{Geo} - Att_{mol} - S_{pérdidas} \quad (15)$$

siendo:

- M_{enlace} : margen del enlace (dB)
- E_p : potencia de la señal de emisión (dBm)
- S_s : sensibilidad (dBm)
- Att_{Geo} : atenuación geométrica del enlace (dB)
- Att_{mol} : atenuación molecular del enlace (dB)
- $S_{pérdidas}$: pérdidas en el equipo (dB) indicadas por el fabricante (posiblemente multiplicadas por 2, suponiendo que sean 0 dB).

Ejemplo:

$$\begin{aligned} d &= 271 \text{ m}, \theta = 4 \text{ mrad}, E_p = 12 \text{ dBm}, S_s = -50 \text{ dBm} \\ Att_{Geo} &= 21 \text{ dB} \\ Att_{mol} &= 0,11 \text{ dB} \\ S_{pérdidas} &= 0 \text{ dB} \\ M_{enlace} &= 12 + |-50| - 21 - 0,11 - 0 = 40,89 \\ M_{enlace} &= 41 \text{ dB.} \end{aligned}$$

En el siguiente punto se describen las distintas atenuaciones fijas que se han tenido en cuenta al calcular el margen del enlace y algunos otros valores que deben conocerse.

Si se trata de una transmisión WDM, para multiplicar la velocidad de transmisión de datos en el mismo FSOL sería más fácil utilizar la relación anterior para una longitud de onda.

5.1.1 Diámetro del haz puntual

El diámetro de la superficie del frente de onda a una distancia « d » depende de la divergencia del haz considerado y viene dado por la siguiente relación:

$$S_d \approx d \times \tan(\theta) \quad (16)$$

siendo:

θ : divergencia del haz (ángulo completo) (rad)

d : distancia del enlace (m)

Sd : diámetro del haz puntual a una distancia d (m).

Ejemplo:

$$d = 271 \text{ m}, \theta = 4 \text{ mrad} = 0,004 \text{ rad}$$

$$Sd = 271 \times \tan(0,004) = 1,084$$

$$Sd = 1,084 \text{ m.}$$

5.1.2 Atenuación geométrica

El haz emitido por el transmisor es divergente (1-3 mrad) y por ello la célula receptora recopilará únicamente una parte de la energía transmitida. La siguiente relación expresa la atenuación geométrica:

$$Att_{Geo} = \frac{S_{sup}}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d\theta)^2}{S_{captura}} \quad (17)$$

siendo:

S_{sup} : superficie del haz puntual a la distancia d

$S_{captura}$ superficie de la zona del receptor (R_a)

θ : divergencia del haz (Bd)

d : distancia transmisor-receptor.

Ejemplo:

$$Sd = 0,92 \text{ m}^2, R_a = 0,00785 = 7,85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$Att_{Geo} = 10 \log_{10} (0,9228 / 0,00785) = 20,70 \text{ dB}$$

$$Att_{Geo} = 21 \text{ dB.}$$

En dB, la atenuación viene dada por:

$$Aff_{dB} = 10 \log_{10}(Aff) \quad (18)$$

5.1.3 Atenuación molecular

La atenuación molecular (O_2 , H_2 , CO_2 , O_3 , ...) constituye un componente bien conocido de la atenuación atmosférica y es función de la longitud de onda utilizada. En el Cuadro 3 aparecen algunos valores típicos al respecto (valores lineales).

CUADRO 3
Valores típicos de la atenuación molecular

Longitud de onda (nm)	Att_{lin} = Atenuación molecular específica (dB/km)
550	0,13
690	0,01
780	0,41
850	0,41
1 550	0,01

La siguiente relación expresa la atenuación molecular para un enlace a una distancia considerada:

$$Att_{mol}(\text{dB}) = Att_{lin}(\lambda) * d \quad (19)$$

siendo:

Att_{lin} : atenuación molecular lineal
 d : distancia transmisor-receptor

Ejemplo:

$$\begin{aligned} d &= 271 \text{ m}, \lambda = 850 \text{ nm}, \text{ por lo tanto } Att_{lin} = 0,41 \text{ dB/km} \\ Att_{mol} &= 0,271 \times 0,41 = 0,111 \text{ dB} \\ Att_{mol} &= 0,11 \text{ dB.} \end{aligned}$$

5.1.4 Nivel recibido

El nivel recibido es la potencia que recibe el receptor a una distancia determinada y este valor es importante para el proceso de instalación. Viene dado por la siguiente ecuación:

$$R_{nivel} = Ep - Att_{Geo} - Att_{mol} - S_{pérdidas} \quad (20)$$

siendo:

R_{nivel} : nivel recibido (dBm)
 Ep : potencia de la señal transmitida (dBm)
 Att_{mol} : atenuación molecular del enlace (dB)
 $S_{pérdidas}$: pérdidas en el equipo (dB) indicadas por el fabricante (posiblemente multiplicadas por 2, suponiendo que sean de 0 dB).

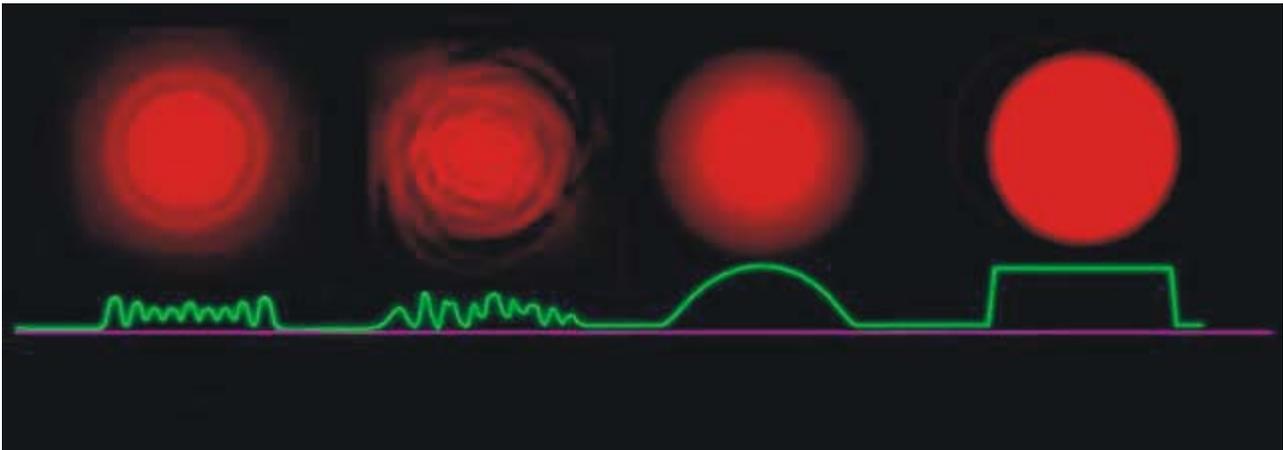
Ejemplo:

$$\begin{aligned} d &= 271 \text{ m}, \theta: 4 \text{ mrad}, Ep: 12 \text{ dBm}, Ss: -50 \text{ dBm} \\ Att_{Geo} &= 21 \text{ dB} \\ Att_{mol} &= 0,11 \text{ dB} \\ S_{pérdidas} &= 0 \text{ dB} \\ R_{nivel} &= 12 - 21 - 0,11 - 0 = -9,11 \text{ dBm} \\ R_{nivel} &= -9 \text{ dBm.} \end{aligned}$$

5.1.5 Homogeneidad del frente de onda del haz

Una de las repercusiones que tiene la homogeneidad del frente de onda del haz es la calidad de las fuentes y sistemas ópticos utilizados. Esos elementos influyen en la calidad prevista del haz y, por consiguiente, en la evaluación del enlace. El objetivo ideal es lograr un haz uniforme con una distribución homogénea de potencia y que la diferencia de potencia en el frente de onda del haz no rebase los 3 dB. La Fig. 11 muestra varios haces y homogeneidades.

FIGURA 11
FSO con varios haces y homogeneidades



Rap 2106-11

5.1.6 Margen para la distancia unitaria

Para un enlace considerado con una distancia determinada, uno de los elementos importantes (pero no el único) que debe conocerse es el margen para la distancia unitaria con objeto de contar con uno de los elementos de comparación del terminal. La siguiente relación lo define:

$$L_{margen} (\text{dB/km}) = M_{enlace} / d \quad (21)$$

siendo:

- L_{margen} : margen (dB/km) para la distancia unitaria
- M_{enlace} : margen de enlace (dB)
- d : distancia (km)

Ejemplo:

$$\begin{aligned} d &= 0,271 \text{ km}, M_{enlace} = 41 \text{ dB} \\ L_{margen} &= 41/0,271 = 151,29 \text{ dB/km} \\ L_{margen} &= 151 \text{ dB/km.} \end{aligned}$$

6 Instalación de FSOL en zonas climáticas específicas

Como se mencionó en el punto anterior, los FSOL requieren generalmente un amplio margen contra la intensidad de lluvia y la niebla. Si se instalan en zonas donde apenas llueve la longitud del enlace podrá aumentarse significativamente. Se supone que a partir de un cálculo sencillo, la exención de un margen de 20 dB dará lugar a un enlace 10 veces más largo. En ese caso, sin embargo, deben tenerse en cuenta los efectos de la atenuación atmosférica L_{atm} (véase el § 3.1) así como la repercusión de la curvatura del haz óptico. Esos efectos causados principalmente por la absorción molecular o la refracción atmosférica debida a la variación de la temperatura podrían observarse en el desvanecimiento por centelleo; es decir, en la fluctuación del nivel recibido. El grado de fluctuación en el desierto, que viene definido por la ecuación (14) del § 3.6, debe ser objeto de más estudio. Sin embargo, para regiones semiáridas, Zilbermann y otros [12] han elaborado un modelo de perfil vertical para Oriente Medio de la intensidad de turbulencia refractiva C_n^2 basado en un amplio conjunto de mediciones LIDAR. Este modelo puede aplicarse a zonas desérticas hasta que en el futuro se establezca un modelo más completo.

Como medida para superar este tipo de desvanecimiento por centelleo, puede ser eficaz la recepción por diversidad utilizando una disposición de lentes separadas.

Otro tema que debe considerarse es el efecto de las tormentas de arena en el desierto, que pueden llegar a obstruir significativamente la condición de visibilidad en un salto entre el transmisor y el receptor. El polvo y la arena desplazados por el viento en el desierto están compuestos por partículas sueltas y de pequeño tamaño (por ejemplo, de calcio, silicio, aluminio y azufre). El efecto de una tormenta de arena sobre la visibilidad del FSOL depende de la velocidad del viento. Aunque existe algún programa informático disponible para calcular el coeficiente de transmisión total (absorción y dispersión) en una zona desértica, este tema no ha sido completamente investigado y puede que requiera estudios ulteriores.

Sin embargo, actualmente el programa informático FASCOD (de ONTAR) que emplea el modelo de desierto (donde los aerosoles son esencialmente partículas de arena en suspensión) puede utilizarse para calcular el coeficiente de transmisión total (absorción y dispersión) en una zona desértica. Los datos de partida necesarios son la visibilidad a nivel del suelo y la velocidad del viento a una altura de 10 m. El usuario puede definir su propio modelo climático y de aerosoles para calcular la atenuación atmosférica o puede emplear las mediciones sobre la concentración del número, volumen y distribución del tamaño del aerosol obtenidas por Zilbermann y Kopeika [12] a partir de mediciones LIDAR realizadas a diferentes alturas en la región Mediterránea (Israel).

7 Consideración sobre aspectos operacionales

Los enlaces ópticos se instalan en cualquier instante y en cualquier lugar. Esto se basa en la hipótesis de que no es necesaria la coordinación para evitar la interferencia entre estos enlaces explotados por distintos operadores.

Teóricamente, la interferencia entre los FSOL puede aparecer en los siguientes entornos:

- cuando dos sistemas utilizan la misma frecuencia (longitud de onda) o frecuencias próximas (longitudes de onda);
- y al mismo tiempo cuando funcionan con una pequeña separación geográfica.

Cuando las frecuencias están próximas, el espectro transmitido de una onda óptica puede superponerse con otro espectro del FSOL causando interferencia inaceptable. En ese sentido, la elección de las frecuencias (longitudes de onda) puede ser un tema que deben considerar los operadores para evitar el efecto de la interferencia entre los FSOL (véase el § 2.3).

No obstante, la interferencia nunca tendrá efectos perjudiciales a menos que los dos enlaces funcionen en un entorno geográfico bastante limitado. Como se menciona en el § 3.1, el haz puntual de la onda de luz en el extremo receptor se ajusta normalmente de forma que su diámetro es de varios metros para una longitud del enlace de aproximadamente 1 km. Ello significa que la potencia transmitida del FSOL está principalmente concentrada en el haz estrecho con un ángulo de apertura del orden de $0,1^\circ$. Por otro lado, la apertura de la lente en el extremo receptor tiene un ángulo ligeramente mayor para adaptarse de forma flexible a la oscilación del edificio o a otros factores de inestabilidad. Cabe señalar que la potencia de onda óptica se reducirá significativamente, por ejemplo varias decenas de dB, fuera del haz puntual de recepción.

Por consiguiente, se supone que es poco probable que aparezca un problema de interferencia entre los FSOL de distintos operadores a menos que estén instalados de forma casi paralela y utilicen la misma frecuencia (longitud de onda).

El efecto de los rayos solares se discute en el § 3.7 y puede que necesite más atención por parte de los operadores a la hora de elegir el emplazamiento de las estaciones de los FSOL.

7.1 Tiempos de propagación

Otra característica interesante de los equipos FSO es su velocidad de transmisión de datos digitales, que posiblemente permite descartar el encaminador para un enlace LAN, por ejemplo.

Evidentemente, la mayoría de los equipos FSO son transparentes al protocolo transmitido. Generalmente, no se somete a ningún tratamiento al contenido o a la naturaleza de los datos, lo que redundaría en unos tiempos de propagación relativamente cortos.

Los parámetros que deben tenerse en cuenta al calcular el tiempo de propagación al acceso son los siguientes:

- tiempo de procesamiento electrónico para los equipos FSO (transmisor y receptor);
- tiempo de propagación de la luz en la atmósfera entre los equipos A y B (tiempo de propagación de la luz en la atmósfera: aproximadamente 3×10^{-9} s/m);
- el tiempo de propagación al acceso es la suma de estos dos parámetros
- ejemplo:
 - enlaces de 500 m;
 - velocidad de transmisión de datos de 155 Mbit/s;
 - tiempo de procesamiento electrónico del equipos FSO: $3 \times 10^{-7} \times 2 = 6 \times 10^{-7}$ s;
 - tiempo de propagación de la luz en la atmósfera entre los equipos A y B: $500 \text{ m} \geq$ tiempo de propagación $1,5 \times 10^{-6}$ s;
 - el tiempo de propagación es: $6 \times 10^{-7} + 1,5 \times 10^{-6} = 2,11 \times 10^{-6} \Leftrightarrow$ es decir $2,11 \mu\text{s}$.

7.2 Confidencialidad de los datos transmitidos

La mayoría de los fabricantes utilizan una modulación de amplitud del tipo «uno-cero» para la transmisión de datos por láser; el protocolo de transmisión generalmente es transparente pero las posibilidades de «piratear» la información son bastante restringidas.

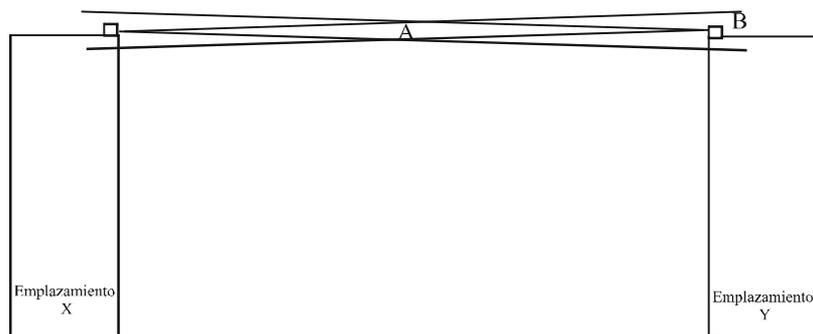
Aparte de la acción directa sobre los equipos o su acceso, existen sólo dos soluciones para que una persona «recupere» los datos transmitidos y ello exige una alta capacitación técnica y una compleja intervención.

El pirateo de la información sólo es posible si la persona lleva a cabo las siguientes operaciones:

- 1) Obtiene el mismo equipo FSO del mismo fabricante, para recopilar y decodificar los datos.
- 2) Efectúa la «recopilación» de datos, una parte del haz que es, no obstante, muy directivo. Y «recupera» suficiente energía para procesarlos (Fig. 12):
 - entre los dos emplazamientos, A, para obtener los datos transmitidos desde el emplazamiento X o el Y únicamente, con la dificultad adicional que supone evitar la interrupción del haz,
 - o, por ejemplo, tras el emplazamiento Y, B, para los datos transmitidos desde X, sabiendo que la atenuación de la señal es muy importante a medida que uno se desplaza alejándose de la fuente,
 - o, por ejemplo, frente a los equipos del emplazamiento Y, B, para los datos transmitidos desde el emplazamiento Y, con la dificultad adicional que supone evitar la interrupción del haz.
- 3) Finalmente, la última dificultad consiste en conocer el protocolo transmitido para entender los datos recopilados.

FIGURA 12

Para obtener los bits transmitidos por los emplazamientos X o Y, el pirata debe recopilar una parte de los haces



Rap 2106-12

7.3 Directrices para implementar los FSOL

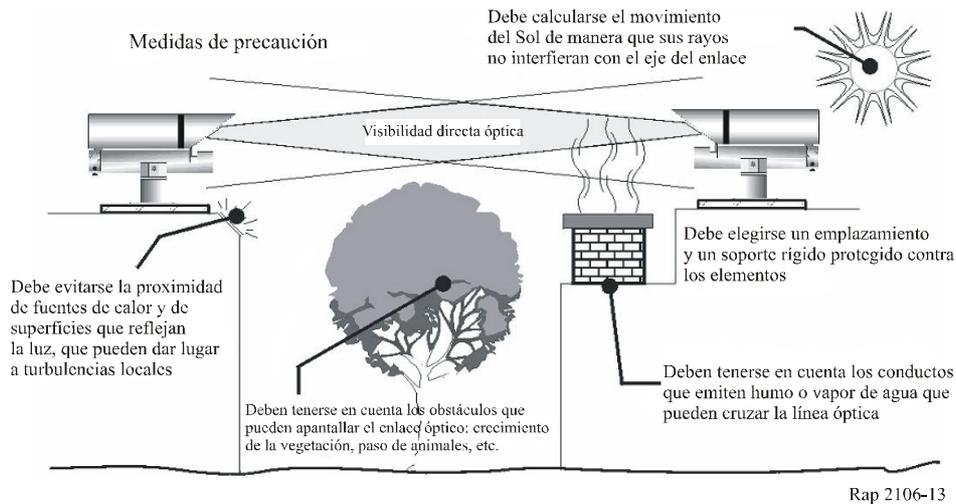
7.3.1 Proceso de instalación de un FSO

Generalmente, los equipos FSO se instalan de forma similar a un sistema inalámbrico fijo:

- proceso de ingeniería del enlace (por ejemplo, con el software «FSO prediction») para definir la disponibilidad del enlace;
- instalación en un punto elevado (edificio, mástil, depósito de agua, ...);
- en línea de visibilidad directa sin obstáculos sobre la trayectoria real o futura;
- tiempo de instalación inferior a un día para un enlace.

Pero debido a esta tecnología específica, deben tomarse algunas medidas de precaución durante el proceso de instalación (Fig. 13).

FIGURA 13

Medidas de precaución en la instalación de un FSO

Dada la característica de los equipos (baja divergencia del haz láser) es necesario un alineamiento muy preciso. El alineamiento del transmisor y el receptor caracteriza el acoplamiento del enlace óptico. Este alineamiento puede verse perturbado por las vibraciones mecánicas. El instalador del sistema de comunicaciones debe:

- fijar los materiales a un soporte rígido o a un muro de carga de manera que estén sometidos al menor número posible de vibraciones o choques (borde del muro, lado del muro, ...);
- evitar el alineamiento directo del enlace óptico con los rayos del Sol;
- evitar la proximidad de elementos que puedan provocar turbulencia atmosférica (chimeneas, superficies reflectantes, ...).

7.3.2 Ejemplo de proceso de alineamiento del FSO

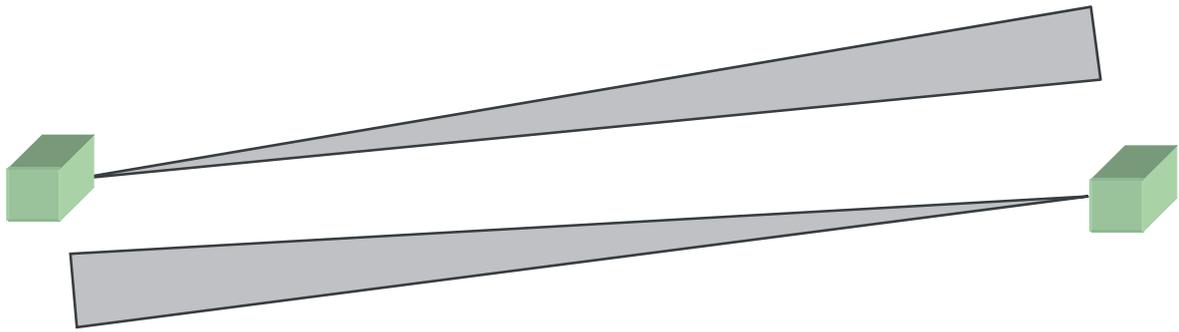
Un proceso de alineamiento del FSO puede realizarse con algunos valores previamente calculados tales como:

- nivel recibido;
- diámetro del haz puntual.

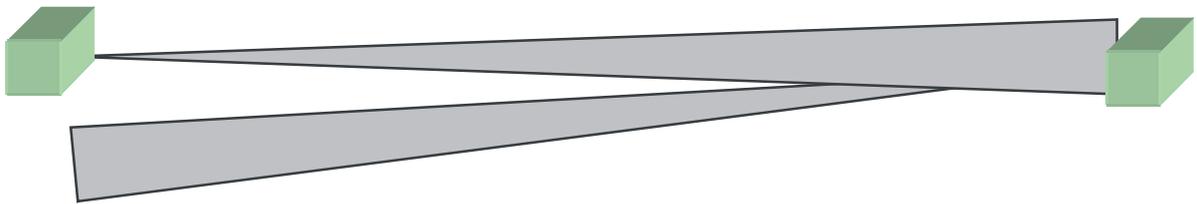
El primer nivel de alineamiento se efectúa de modo visual en elevación y acimut en ambos lados.

El alineamiento de precisión debe realizarse mediante cámaras, niveles de sonido, frecuencias de bips e indicación de medidores de potencia, y debe seguir los siguientes pasos (Figs. 14 y 15).

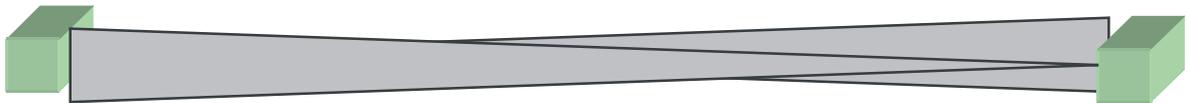
FIGURA 14
Ejemplo de proceso de alineamiento



a) Alineamiento del haz FSO en el lado 1 con el receptor FSO en el lado 2



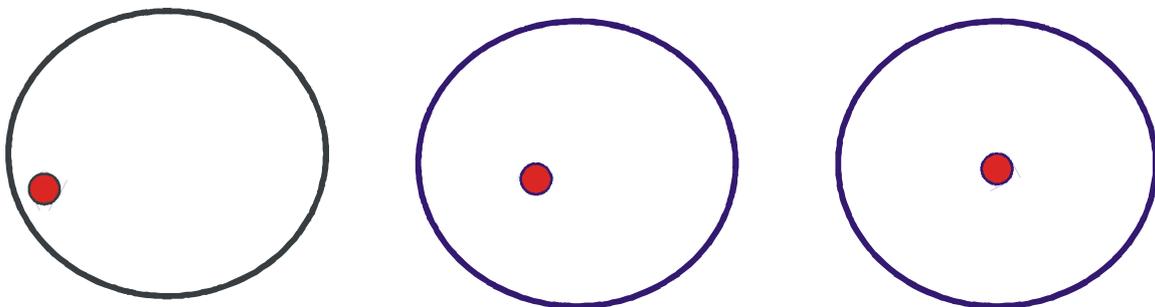
b) Alineamiento del haz FSO en el lado 2 con el receptor FSO en el lado 1



c) Adicionalmente, el centrado preciso del frente de onda del emplazamiento 1 (púrpura) se compara con la zona del receptor (Ra) (rojo) del emplazamiento 2 y viceversa (en elevación y acimut)

Rap 2106-14

FIGURA 15
Proceso de alineamiento de precisión



Rap 2106-15

7.4 FSOL múltiples

En caso de implementar múltiples FSOL con la misma longitud de onda y el mismo nivel de recepción, deben tomarse las siguientes precauciones para evitar errores en los bits:

- la mínima separación del diámetro del haz puntual entre los dos FSOL paralelos o casi paralelos debe ser dos veces mayor que la distancia más corta al diámetro del haz puntual del FSOL;
- la mínima separación angular entre dos FSOL deber ser el doble que el ángulo total de divergencia del FSOL a la distancia más corta;
- cabe señalar que la CE 15 del UIT-T ha elaborado la Recomendación UIT-T G.640 sobre este tema – Interfaces compatibles coubicadas longitudinalmente para sistemas ópticos en el espacio libre.

8 Resumen

Este Informe considera las características de los FSOL para aplicaciones del SF así como sus requisitos técnicos/de funcionamiento. Los puntos anteriores se han centrado en los FSOL para aplicaciones del servicio fijo y cabe señalar que existen otros tipos de FSOL; por ejemplo, los relativos a los servicios móviles o a los servicios espaciales. Los temas que requieren más estudio o que deben tenerse en cuenta son los siguientes:

- tendencias de los desarrollos tecnológicos en los dispositivos ópticos;
- expansión de las aplicaciones del SF;
- compatibilidad, si es necesario, con los FSOL para otras aplicaciones de servicios de radiocomunicaciones.

Los futuros estudios pueden extender los FSO a sistemas exteriores FSO multipunto, sistemas interiores FSO punto a punto y punto a multipunto y procesos de prueba y mediciones.

Referencias

- [1] G. Nykolak, *et al.*, «4 X 2.5 Gb/s 4.4 km WDM free-space optical link at 1 550 nm,» in Proc. OFC'99, PD11, 1999.
- [2] Y. Aburakawa, «Dense wavelength division multiplexed optical wireless link towards terabit transmission» in Proc. Of MWP'03, pp. 135, 2003.
- [3] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 60825-1 standard, «Safety of laser products».
- [4] G. Mie, Ann. Physik., Vol. 25, pp. 377-445, 1908.
- [5] K. Morita, *et al.*, «Light wave attenuation in propagation through the atmosphere,» Review of Electrical Communications Labs., Vol. 19, No. 714-725, pp. 798-842, 1971.
- [6] Final Approach Visibility Studies, 1955, U.S. Weather Bureau.
- [7] Y. Aburakawa, *et al.*, «Experimental evaluation of 800-nm band optical wireless link for radio access network,» IEICE Trans. Electron., Vol. E86-C, pp. 1 175-1 183, No. 7, 2003.

- [8] J.S. Marshal and W.M. Palmer, «The distribution of raindrops with size», Journal of the Meteorology, Vol. 5, No. 6, pp. 165, 1948.
- [9] K. Morita, and I. Higuchi, «Statistical studies on electromagnetic wave attenuation due to rain,» Review of Electrical Communications Labs., Vol. 19, No. 7-8, pp. 798-842, 1971.
- [10] N. Hiromoto, «Novel detector technologies for infrared communication and sensing, CRL International Topic Workshop on Space Laser Communication Current Status and Future Perspectives, pp. 90-95, 1997.
- [11] M. Akiba, *et al.*, «Measurement of optical propagation characteristics for free-space optical communication during rainfall», IEICE Trans. Commun., Vol. E87-B, N° 7 de julio de 2004.
- [12] Zilberman A., Kopeika N. S., «Aerosol and turbulence characterization at different heights in semi-arid regions», Proc. SPIE Vol. 5891, p. 129-140.
- [13] P. Bataille, «Analyse du comportement d'un système de télécommunication optique fonctionnant à 0,83 micron dans la basse troposphère», Thèse, Université Rennes, 1992.
- [14] H. Vasseur, *et al.*, «Influence de la troposphère sur les liaisons sans fil aux ondes millimétriques et optiques», Propagation électromagnétique du décimétrique à l'angström, 3ièmes journées, Rennes 1997.
- [15] T.H. Carbonneau, D.R. Wiseley, «Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free-space telecommunications link in today's crowded marketplace», SPIE Conf. on optic. Wireless Com., Boston, EE.UU. Vol. 3232, 1998.

Anexo 1

Ejemplos de balance del enlace

1 Ejemplos de balance del enlace

El diseño del balance del enlace para los FSOL se obtiene básicamente a partir de la disponibilidad del enlace requerida teniendo en cuenta las características de propagación en el emplazamiento donde va a instalarse el enlace.

El Cuadro A1-1 indica ejemplos de parámetros del sistema para dos tipos distintos de FSOL. En ambos sistemas, se ha adoptado un diodo láser (DL) con la misma potencia de transmisión. Además las pérdidas de dispersión del haz, L_p , se han seleccionado de forma que presenten un valor equivalente de 24 dB. Las pérdidas de dispersión del haz suponen para el FSOL una parte muy importante de las pérdidas del enlace entre el transmisor, Tx y el receptor, Rx; es decir, pérdidas en el espacio libre menos la ganancia de antena en el caso de la onda eléctrica. L_p se expresa teóricamente mediante la siguiente fórmula:

$$L_p = (A_r / w_r)^2 L_{atm} \quad (\text{A-1})$$

siendo:

- w_r : diámetro del haz puntual del rayo de luz transmitido a la distancia r (longitud de enlace)
- A_r : apertura efectiva de las lentes de recepción.

Estos parámetros, w_r y A_r , pueden ajustarse mediante la función de convergencia de las lentes ópticas instaladas en el Tx o en el Rx. Normalmente se considera que las pérdidas atmosféricas, L_{atm} , son reducidas, como se indica en el § 3.1.

La potencia recibida requerida se obtiene a partir del cálculo de L_p incluidos los márgenes necesarios para tener en cuenta los efectos de la niebla y la lluvia. En los ejemplos del Cuadro A1-1, los márgenes totales se han diseñado para un valor aproximado de 22 dB en ambos tipos.

Es sabido que dos FSOL con distintas longitudes de enlace pueden funcionar con unas pérdidas de dispersión del haz y potencia de transmisión equivalentes con objetivos de interrupción muy distintos.

Cabe señalar que la tasa de interrupción del enlace del 0,1% en el Tipo 1 puede no ser aplicable a la conexión de la red pública; por ejemplo, RTPC o RDSI. Por otro lado, el FSOL de Tipo 2 con una tasa de interrupción mucho más baja puede servir como un sistema de acceso inalámbrico fijo conectado a las redes centrales públicas.

CUADRO A1-1

Ejemplo de diseño de balance del enlace para un FSOL

Parámetros	Tipo 1	Tipo 2
Longitud de enlace (m)	900	350
Capacidad del enlace (Mbit/s)	622,08	
BER requerida	BER = 10^{-9}	
Tasa de interrupción del enlace	0,1% (aproximadamente 9 h/año)	0,004% (aproximadamente 20 min/año)
Potencia de transmisión (salida del DL: nominal)	13 dBm (20 mW)	
Pérdidas de inserción del Tx (dB)	3	
Pérdidas de dispersión del haz (dB)	24	
Pérdidas de inserción del Rx (dB)	3	
Margen de niebla (Nota 1) (dB)	14,0	15,5
Margen de intensidad de lluvia (Nota 1) (dB)	8,0	6,5
Sensibilidad de receptor (dBm)	-40	

NOTA 1 – Valor basado en los datos estadísticos observados en Tokio [7] [9].

2 Ejemplo de predicción de disponibilidad del FSO

Uno de los elementos importantes que deben conocerse en las transmisiones del FSO es el margen del FSO. De hecho, siguiendo el ejemplo de los equipos de los operadores radioeléctricos o los sistemas de radioenlaces, tiene gran importancia conocer el margen de un enlace determinado. Cuando se instala un enlace, los modelos matemáticos permiten calcular la disponibilidad del mismo durante un año o durante el mes más desfavorable, por ejemplo.

El primer paso consiste en determinar el margen del enlace. Este elemento permite conocer la capacidad del equipo láser para la transmisión de datos digitales a pesar de las variaciones de las condiciones climatológicas.

Para utilizar los modelos de predicción, los parámetros necesarios de los equipos son los siguientes (lista no exhaustiva):

- potencia transmitida;
- sensibilidad del receptor;
- zona de captura del receptor;
- divergencia del haz transmitido.

A partir de estos datos, por ejemplo, puede calcularse el valor de la atenuación geométrica así como el margen del enlace y, por último, la disponibilidad.

2.1 Algunos márgenes del enlace

En el Cuadro que aparece a continuación se indican algunos ejemplos de cálculo de un margen de enlace para tres equipos típicos. Los cálculos se han realizado para una distancia de 500 m y se ha despreciado la atenuación molecular. Estos márgenes del enlace, cuyos datos se dan como ejemplo, son elementos básicos para determinar posteriormente la atenuación de la señal láser debida a fenómenos climáticos (niebla, lluvia, nieve, centelleo, ...).

CUADRO A1-2

Ejemplo de tres márgenes del enlace

Potencia de emisión (dBm)	10	13	26
Sensibilidad (dBm)	-35	-40	-36
Atenuación geométrica (dB) ($D = 500$ m)	26	17	18
Pérdidas del sistema (dB)	1	2	0
Margen del enlace (dB)	18	34	44

2.2 Disponibilidad y calidad de servicio

Este punto presenta un ejemplo concreto de estudio de la calidad de servicio para un enlace determinado utilizando las características de tres equipos FSO.

En el ejemplo se consideraron los siguientes elementos:

- distancia del enlace: 500 m;
- fabricante: tres fabricantes de distintos orígenes (A, B y C);
- equipo: una interfaz SDH de 155 Mbit/s con fibra óptica;
- modelo: se aplicaron los modelos de France Telecom que dan la atenuación por aerosoles (niebla) que es la atenuación más perturbadora para un FSOL;
- emplazamiento: sólo se estudió un emplazamiento, Rennes (Francia).

El estudio de la calidad de servicio es un proceso que se realiza en tres etapas; posteriormente, este proceso puede informatizarse parcial o totalmente.

2.2.1 Ejemplo de cálculo de la mínima visibilidad

Se consideró un enlace de 500 m con una interfaz de 155 Mbit/s. A partir del margen del enlace lineal, aplicando los modelos de atenuación de France Telecom, se determinó el valor de la mínima visibilidad.

CUADRO A1-3

Ejemplo de tres cálculos de mínima visibilidad

	Equipo A	Equipo B	Equipo C
Longitud de onda (nm)	690	850	1 550
Distancia del enlace (m)	500	500	500
Potencia de transmisión (dBm)	10	13	26
Sensibilidad (dBm)	-35	-40	-36
Atenuación geométrica (dB)	25,94	17,4	18,59
Atenuación molecular (dB)	0,05	0,205	0,05
Pérdidas del sistema (dB)	0	0	0
Margen del enlace (dB)	19	35	43
Margen lineal (dB/km)	38	71	87
Valor de la mínima visibilidad (m)	470	250	210

2.2.2 Ejemplo de datos estadísticos del clima

A partir de los boletines meteorológicos proporcionados por Météo France, para la ciudad de Rennes, cuyo contenido es el porcentaje horario de aparición de niebla con datos sintetizados a lo largo de un amplio periodo de tiempo, se trazaron gráficos que presentan el porcentaje acumulado de aparición de niebla en tres periodos de tiempo:

- 08.00 h. a 20.00 h.;
- 20.00 h. a 08.00 h.;
- un día completo desde las 00.00 h a las 24.00 h.

Estos boletines meteorológicos tienen las siguientes características:

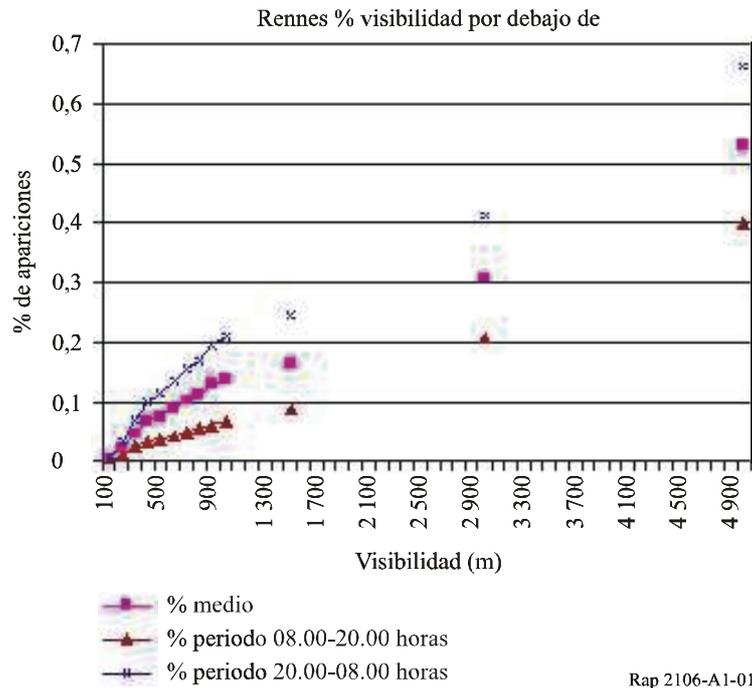
- visibilidad horaria;
- de 100 a 5 000 m;
- de 1 992 a 2 002;
- más de 73 000 observaciones;
- porcentaje acumulado de aparición;
- tres periodos de observación horaria.

Se trazaron tres curvas en el gráfico que representan:

- en la coordenada X, el mínimo valor de la visibilidad (m) (es decir, la densidad de niebla);
- en la coordenada Y, el porcentaje de apariciones de las diversas visibilidades mínimas (%).

FIGURA A1-1

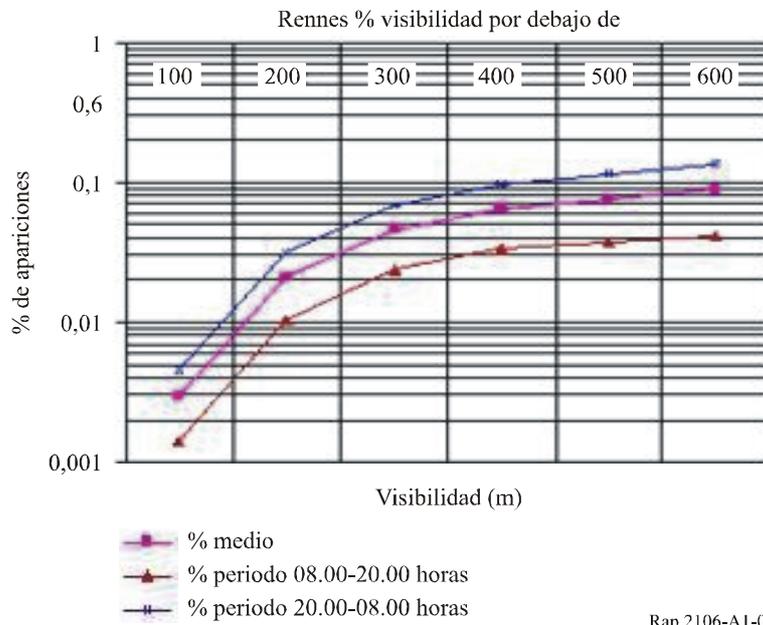
Porcentaje de aparición de niebla con un valor de visibilidad determinado



Para una mejor legibilidad, se presenta a continuación el eje X en escala logarítmica.

FIGURA A1-2

Porcentaje de aparición de niebla para un valor de visibilidad determinado (escala logarítmica)



2.2.3 Ejemplo de cálculo de la disponibilidad del enlace

Un FSOL está indisponible cuando la densidad de niebla es superior al margen del enlace. Utilizando los gráficos meteorológicos se determina el porcentaje de tiempo durante el cual se produce una indisponibilidad del FSOL. Por extensión, se determina la disponibilidad anual

del FSOL considerado expresada como porcentaje y en número de horas (o minutos). El estudio de la indisponibilidad de un FSOL se lleva a cabo tomando el mínimo valor de visibilidad para cada equipo (en la coordenada X) y determinando el valor de la aparición, en porcentaje. Una vez conocido este valor, se considera que el FSOL está indisponible cuando lo supera.

Los Cuadros que aparecen a continuación presentan los valores en porcentajes y los valores de indisponibilidad para cada pieza de equipo.

CUADRO A1-4

Visibilidad y periodos

% de aparición		Equipo A	Equipo B	Equipo C
Mínimo valor de la visibilidad (m)		342	184	150
Modelo zoom	Día	0,052	0,015	0,008
	Periodo 08.00 h a 20.00 h	0,028	0,007	0,004
	Periodo 20.00 h a 08.00 h	0,08	0,022	0,012

Por extensión, se determina la disponibilidad del FSOL considerado, expresada en porcentaje y número de horas (o minutos) al año. Para el emplazamiento considerado véase el Cuadro A1-5.

CUADRO A1-5

Disponibilidad del enlace en el emplazamiento de Rennes para tres piezas distintas de los equipos A, B y C

Equipo A	% de disponibilidad	Indisponibilidad – Número de horas/año
Año	99,948	4,56
Periodo 08.00 h a 20.00 h	99,972	1,23
Periodo 20.00 h a 08.00 h	99,920	3,50

8 760 horas = 1 año

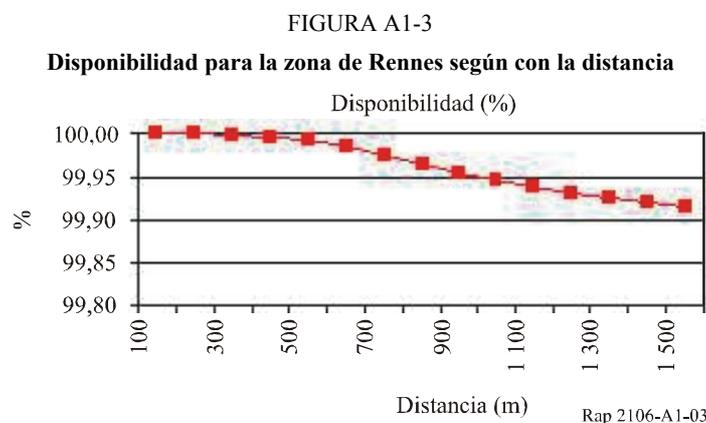
Equipo B	% de disponibilidad	Indisponibilidad – Número de horas/año
Año	99,985	1,31
Periodo 08.00 h a 20.00 h	99,993	0,31
Periodo 20.00 h a 08.00 h	99,978	0,96

8 760 horas = 1 año

Equipo C	% de disponibilidad	Indisponibilidad – Número de horas/año
Año	99,992	0,70
Periodo 08.00 h a 20.00 h	99,996	0,18
Periodo 20.00 h a 08.00 h	99,988	0,53

2.2.4 Ejemplo de disponibilidad de acuerdo con la distancia del enlace

Otro método consiste en presentar la calidad de servicio en función de la distancia del FSOL para el emplazamiento considerado.



A partir de este ejemplo cabe hacer tres observaciones importantes:

- La calidad de servicio de un FSOL depende en gran medida de las condiciones meteorológicas locales (por ejemplo, la niebla) y el procesamiento de estos datos climáticos es esencial.
- La gestión de la calidad de servicio depende de la distancia del enlace (bajo condiciones meteorológicas idénticas) y podría llevarse a cabo una modificación o una mejora de este parámetro mediante la adecuada selección de los equipos o el fabricante. Por ejemplo, de los gráficos anteriores se deduce que si se desea una calidad de servicio superior al 99,95% en Rennes, será necesario que el FSOL no rebase una longitud de 900 m.
- Este proceso, y otros procesos de parametrización del clima pueden informatizarse.

Anexo 2

Comparación entre Recomendaciones UIT-R y el software de calidad de servicio «FSO prediction» (Experimento en Francia)

1 Introducción

Un operador (FSO 04) ha logrado llevar a cabo una evaluación sobre las capacidades de los productos FSO y ha desarrollado un software interno, «FSO prediction». Para lograr estos objetivos se realizó un experimento que permitía confrontar las capacidades de los equipos FSO con los datos sobre el clima. El estudio se realizó en las instalaciones de France Telecom cerca de Toulouse y a lo largo de un periodo aproximado de seis meses (12.01.2004 – 31.05.2005), durante la estación invernal, que es la estación más desfavorable para un producto que utilice tecnología FSO a fin de transmitir datos numéricos.

Se definieron dos objetivos:

- Confrontar los resultados del software «FSO prediction» con los datos obtenidos en experimentación sobre el terreno durante un periodo de tiempo suficientemente largo a fin de obtener conclusiones válidas con datos estadísticamente relevantes.

- Análisis estadístico dirigido fundamentalmente hacia los fenómenos más desfavorables de un enlace óptico; es decir, la atenuación debida a la niebla o la atenuación atmosférica.
- Verificación de la coherencia de los resultados con otros fenómenos de atenuación y los resultados procedentes de los datos obtenidos en pruebas de funcionamiento real.
- Confrontar los resultados del enlace FSO con los objetivos de las Recomendaciones UIT-R basándose en un enlace de microondas:
 - Recomendación UIT-R F.1703 – Objetivos de disponibilidad para enlaces inalámbricos fijos digitales reales utilizados en las conexiones ficticias de referencia y trayectos ficticios de referencia de 27 500 km.
 - Recomendación UIT-R F.1668 – Objetivos de característica de error para los enlaces inalámbricos fijos digitales utilizados en las conexiones ficticias de referencia y trayectos ficticios de referencia de 27 500 km.

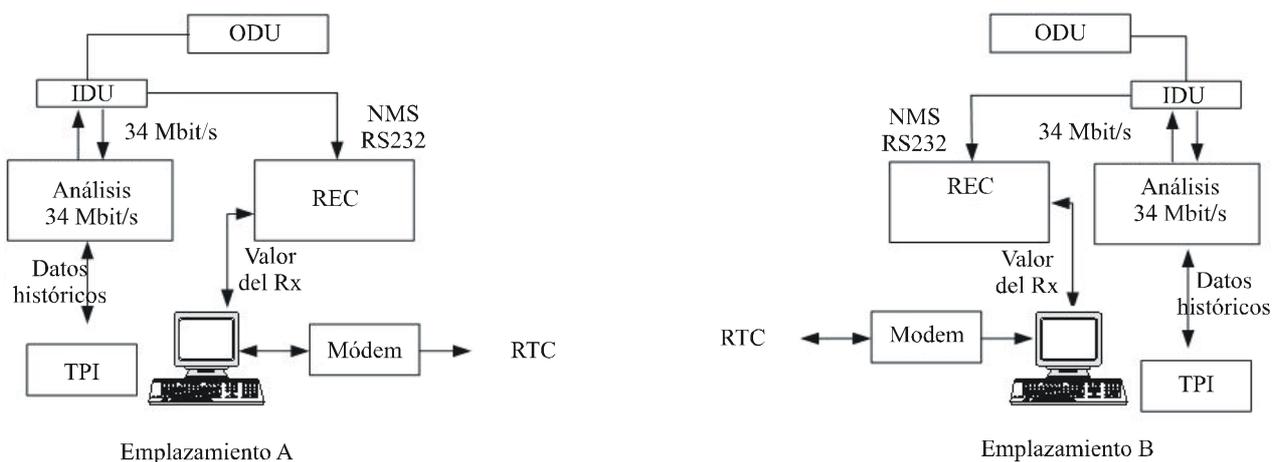
Tras una breve presentación sobre las características del emplazamiento del experimento y el equipo FSO, se llevó a cabo una breve introducción del «FSO prediction», que es un software de simulación de calidad de servicio de un enlace óptico elaborado por France Telecom Research & Development.

A continuación se compararon los resultados del software con los datos del enlace óptico y los datos meteorológicos, durante el periodo considerado, para lograr los dos objetivos.

2 Prueba de funcionamiento real del FSOL

2.1 Características del emplazamiento y de los equipos

FIGURA A2-1
Características del enlace



Rap 2106-A2-01

Descripción de los equipos en cada emplazamiento:

- El FSO (ODU – Unidad de exteriores e IDU – unidad de interiores) transmite una trama bilateral PDH a una distancia de aproximadamente 270 m entre dos edificios denominados A y B.

- El analizador de la transmisión de trama PDH, denominado Victoria, registra cada segundo los posibles errores o indisponibilidad y transmite los resultados a un PC cada 15 minutos a través de una conexión RS-232. Se trata de un análisis bilateral. Entre los datos registrados seleccionamos y concatenamos:
 - ES: los segundos con error (errores de bit)
 - SES: los segundos con muchos errores
 - La indisponibilidad.
- El software de supervisión patentado registra, durante cada minuto, el nivel recibido (sensibilidad) y transmite continuamente los datos hacia un PC.
- Se instala un módem RTC para que intervenga, a través de cualquier software del PC, en caso de que surjan problemas.
- Los datos meteorológicos proceden de la estación meteorológica France situada en el aeropuerto de Blagnac (a menos de 500 m del emplazamiento de experimentación de France Telecom). Los datos se transmiten, cada semana, mediante correo electrónico y se definen por las siguientes mediciones:
 - Transmisómetro, que da el valor de la visibilidad (Todos los valores – frecuencia: cada minuto, aproximadamente 40 000 valores al mes).
 - Pluviómetro, que proporciona la intensidad de precipitación (máximo valor, frecuencia: cada 6 minutos).
 - Nieve, que da la intensidad de nieve (máximo valor).
 - Piranómetro, que da la intensidad de luz (máximo valor).

2.2 Diseño del enlace

2.2.1 Datos técnicos

El FSOL está constituido por dos equipos terminales (cada uno con ODU y IDU) orientados uno hacia el otro y ofreciendo una conexión bilateral PDH a una distancia de aproximadamente 270 m. En el marco del enlace de la instalación cierta información es esencial [BOU 06], a saber:

- el margen del enlace,
- el nivel recibido,
- el diámetro del haz puntual.

2.2.2 Datos de funcionamiento real

Tras el proceso de instalación, los datos medidos del enlace, en cada sentido, se presentan en los Cuadros A2-1 y 2:

CUADRO A2-1
Sensibilidad A a B

Sentido: De A a B	Nivel recibido	Teóricamente	–9 dBm
		Real	–11 dBm⁽¹⁾
	Margen del enlace	Teóricamente	41 dB
		Real	39 dB

⁽¹⁾ La diferencia de 2 dB posiblemente puede reducirse realizando una orientación más precisa.

CUADRO A2-2
Sensibilidad B a A

Sentido: De A a B	Nivel recibido	Teóricamente	-9 dBm
		Real	-16 dBm⁽¹⁾
	Margen del enlace	Teóricamente	41 dB
		Real	34 dB

⁽¹⁾ La diferencia de 5 dB entre los dos sentidos se mantiene voluntariamente para estudiar la sensibilidad del margen comparada con los criterios de disponibilidad y calidad de servicio.

3 Software de simulación

El software «FSO prediction» V3.00 permite:

- Calcular el diseño del enlace óptico para cualquier emplazamiento geográfico.
- Calcular la disponibilidad de este enlace para cualquier lugar en Francia (en esta versión).

3.1 Ventana de captura de datos

A partir de las mediciones de los datos del emplazamiento y de los equipos FSO se introducen estos valores en la primera ventana del software «FSO prediction», divididos en seis bloques de elementos: bloque de emplazamientos de datos, bloque de equipos, datos de emplazamientos comunes, datos de equipos comunes, entorno e información. A continuación se arranca el proceso de cálculo que permite determinar los diversos parámetros del enlace y definir la calidad de servicio y la disponibilidad a partir de los boletines meteorológicos.

FIGURA A2-2
Ventana de captura de datos Windows

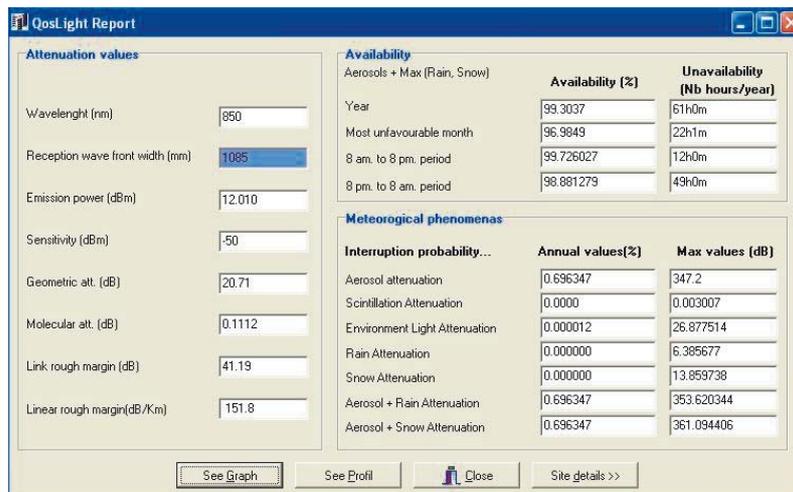
Rap 2106-A2-02

3.2 Ventana de informe

La ventana de informe muestra:

- El elemento de bloque de disponibilidad
 - Una disponibilidad durante el año del 99,3037% corresponde a 61 h de interrupción.
 - Una disponibilidad durante el mes más desfavorable del 96,9849% corresponde a 22 h de interrupción y es el 36% del volumen de interrupción en el año.
 - Una disponibilidad durante el día del 99,7260% es el 20% del volumen de interrupción de un día.
 - Una disponibilidad durante la noche del 98,8813% es el 80% del volumen de interrupción de un día.
- Elemento de bloque de fenómenos meteorológicos
 - Una influencia de la niebla del 0,696347% es el 99,9982% del volumen de los fenómenos.
 - Una influencia de la luz ambiente del 0,000012% es el 0,0018% del volumen de los fenómenos.
- No hay influencia del centelleo ni de la lluvia y la nieve.

FIGURA A2-3
Ventana de informe



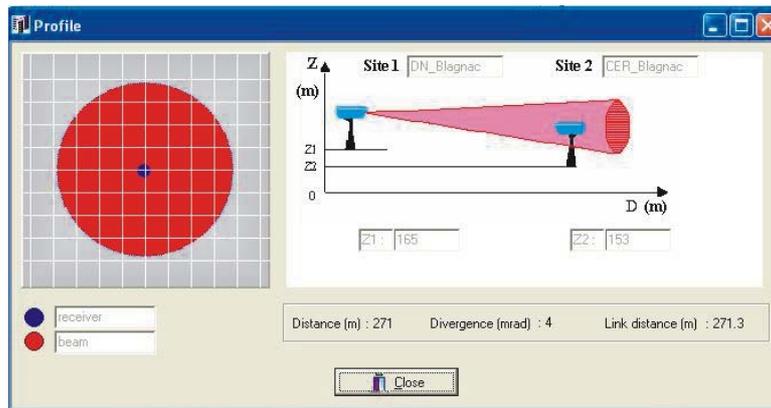
Rap 2106-A2-03

3.3 Ventana del perfil

Esta ventana se refiere a ambos emplazamientos y la diferencia entre el haz puntual en el receptor y la superficie del receptor. La relación viene dada por el cociente entre el haz puntual en el receptor y la superficie del receptor, y es igual a $1085/100$; lo cual supone un valor de 10,85 que indica:

- Una importante proporción que permite lograr una orientación del enlace bilateral en buenas condiciones.
- Una buena resistencia a los fenómenos de vibración o dilatación de los soportes (edificios).

FIGURA A2-4
Ventana de perfil



Rap 2106-A2-04

4 Comparación de los resultados

En este Capítulo se ha descrito el proceso de comparación entre los datos obtenidos en el experimento durante seis meses, los criterios de disponibilidad de la calidad de servicio y los valores proporcionados por el software.

4.1 Comparación de los resultados obtenidos por «FSO prediction» con los de la estación meteorológica France

4.1.1 Atenuación por aerosoles (niebla)

Se analizan y comparan tres fórmulas de atenuación por aerosoles o niebla para verificar los modelos determinados por Al Naboulsi y Al y se integran en el software «FSO prediction».

Estos modelos son:

- modelo Kim y Al;
- modelo de niebla de advección Al Naboulsi y Al para el periodo diurno; y
- modelo de niebla de radiación Al Naboulsi y Al para el periodo nocturno.

Ejemplo de atenuación de la radiación debida a la niebla (véase la ecuación (3) en el § 3.2.2 del texto principal)

$$Aff_{niebla,d} = 10 \log_{10}(1/\tau(\lambda, d)) = 10 \log_{10}(1/\exp(-\sigma(\lambda)d)) = 10 \log_{10} \exp(\sigma(\lambda)d) = 10 \frac{\ln(\exp(\sigma(\lambda)d))}{\ln 10}$$

Es equivalente a:

$$Aff_{niebla,d} = \frac{10}{\ln 10} \sigma(\lambda)d$$

Por ejemplo, para una visibilidad de 80 m con niebla se obtiene: $\sigma(850)d = 49,97$ y $Aff_{niebla} = 217$ dB/km.

4.1.1.2 Proceso

Los datos se procesan para proponer modelos comparativos basados en la interrupción del FSOL. Esos datos se seleccionan cuando existe una niebla (boletín meteorológico – datos de visibilidad) suficientemente intensa como para interrumpir el enlace óptico.

Por ejemplo, una niebla con una visibilidad de 100 m equivale a una atenuación por aerosoles en torno a 180 dB/km, lo que supone para la distancia del enlace unos 49 dB. Este valor es superior al margen del enlace (margen lineal: 124 dB/km) y, por consiguiente, en teoría se produce una interrupción de la conexión.

Esta interrupción por la niebla debe confirmarse al mismo tiempo que las tipologías (MM:DD:YY-HH:MM) mediante los ficheros de datos del analizador de transmisión (valor de indisponibilidad del enlace) y los datos de software de supervisión del FSO (valor de la sensibilidad – $S \leq 55$ dBm – interrupción equivalente durante las pruebas de laboratorio).

Sólo se seleccionan los datos para los cuales la interrupción se debe únicamente a la niebla.

4.1.1.3 Resultados

Aproximadamente se seleccionaron algo más de 400 valores que respondían a las características antes descritas. Algunos datos incoherentes (visibilidad importante y conexión operacional) se rechazaron. Ello puede explicarse por la distancia relativa entre el emplazamiento del experimento del FSOL y la ubicación de la estación meteorológica France (500 m) que supone un ligero desplazamiento temporal en los registros cuando el movimiento de la niebla es perpendicular a los dos emplazamientos; o producen resultados aberrantes cuando el desplazamiento de la niebla es paralelo a ambos emplazamientos.

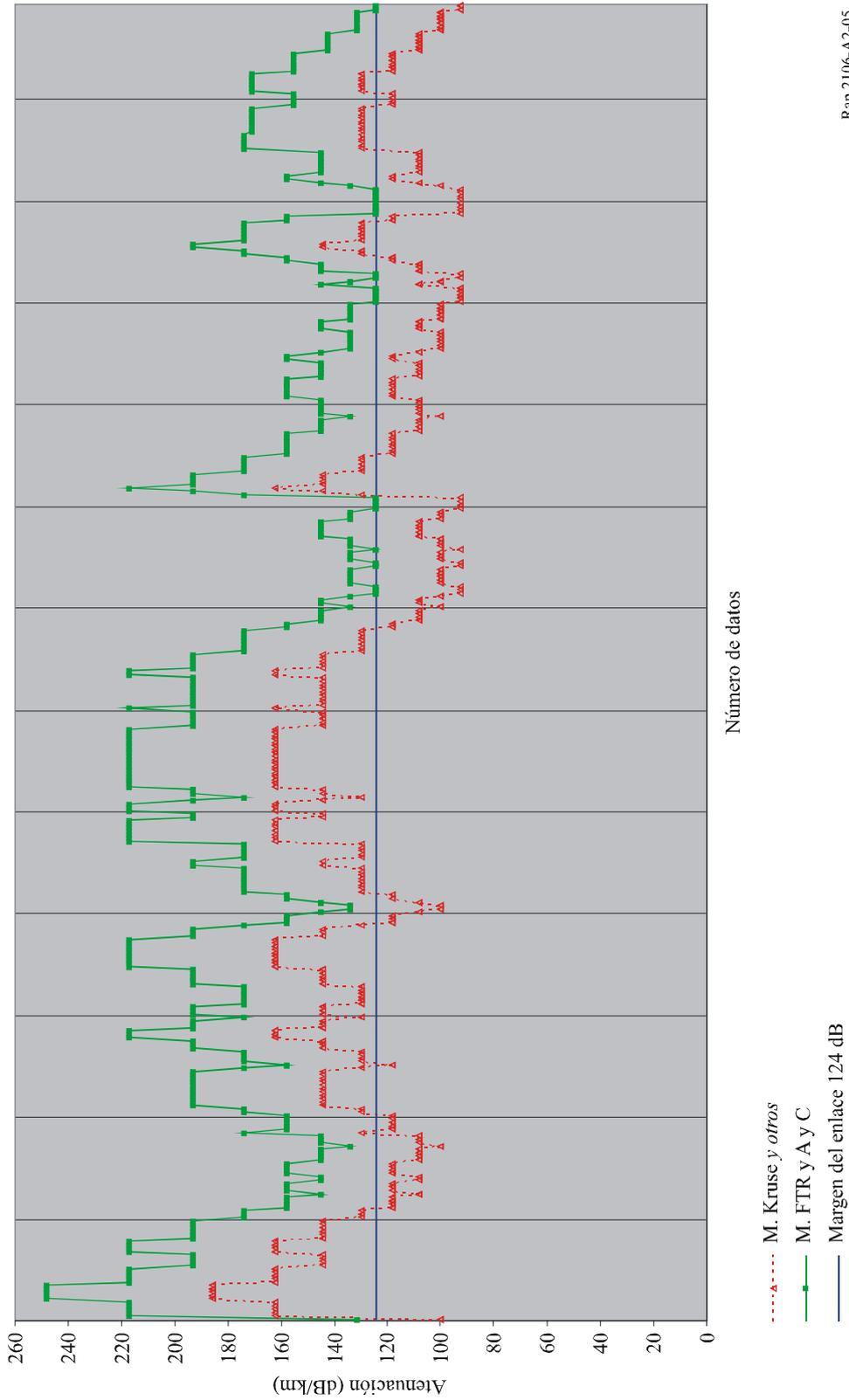
Los resultados que figuran en el gráfico que aparece a continuación son los siguientes:

- el margen del enlace lineal óptico, que es 124 dB/km (recta azul),
- la fórmula de atenuación por niebla de Kim y Al (curva de puntos roja),
- las fórmulas de atenuación por niebla de Al Naboulsi, asociadas por hora del evento para la selección de uno de los dos modelos (curva verde).

Todos los valores representados en el gráfico se seleccionaron debido a una visibilidad muy baja lo que significa un intenso valor de atenuación por niebla que supone una interrupción obligatoria del enlace óptico.

Parece que para una configuración de interrupción del enlace, las fórmulas de atenuación por niebla de Al Naboulsi presentan una coherencia completa con el margen del enlace (100%), mientras que la fórmula de atenuación por niebla de Kim y Al no es coherente en casi el 50% de los casos. Las fórmulas de atenuación por niebla de Al Naboulsi parecen estar más de conformidad con la realidad.

FIGURA A2-5
Comparación de atenuación debida a la niebla



4.1.2 Otras atenuaciones

4.1.2.1 Atenuación debida a la lluvia

La atenuación debida a la lluvia es función de la intensidad de precipitación R (mm/h) de acuerdo con la siguiente relación (A-2):

$$Att_{lluvia} = 1,076 * R^{0,67} \quad \text{dB/km} \quad (\text{A-2})$$

donde:

R : intensidad de precipitación (mm/h).

El programa «FSO prediction» proporciona un valor de indisponibilidad nula para atenuación debida a la lluvia. La estación meteorológica France indica que el máximo valor obtenido en las mediciones de lluvia durante el periodo considerado fue $R = 1,6$ mm de lluvia durante un periodo de 6 minutos, el 13 de mayo de 2005, lo que en una proyección pesimista supone 16 mm/h.

Atenuación debida a la lluvia: $R = 16$ mm/h, $Att_{lluvia} = 1,076 \times (16)^{0,67} = 6,89$; $Att_{lluvia} = 7$ dB/km

Atenuación debida a la lluvia en el enlace: $Att_{lluvia-enlace} = (271 \times 7)/1\,000 = 1,89$ dB; es decir $Att_{lluvia-enlace} = 2$ dB.

Este valor es inferior al margen del enlace, por lo tanto el fenómeno no perturba al enlace óptico. El resultado obtenido con el software «FSO prediction» es coherente con los datos meteorológicos del periodo considerado.

4.1.2.2 Atenuación debida a la nieve

La atenuación debida a la nieve es función de la longitud de onda (λ_{nm}) y la intensidad de precipitaciones de S (mm/h) de acuerdo con la siguiente relación (fórmula para nieve húmeda, altitud del emplazamiento inferior a 500 m) (A-3):

$$Att_{nieve} = (0,0000542 * \lambda_{nm} + 5,4958776) * S^{1,38} \quad \text{dB/km} \quad (\text{A-3})$$

El programa «FSO prediction» da un valor de indisponibilidad nula para la atenuación debida a la nieve. La estación meteorológica France indica que las mediciones de nieve en la estación se llevan a cabo de dos formas:

- nivel de agua equivalente a la nieve (corresponde a la cantidad de precipitación),
- nivel de nieve en el suelo.

Durante el periodo considerado, el nivel de nieve obtenido en la estación meteorológica Toulouse-Blagnac no alcanzó el valor suficiente como para ser mensurable. Por consiguiente se tiene un valor cero para el fenómeno climático nieve.

En consecuencia $Att_{nieve} = 0$ dB.

Este valor es evidentemente inferior al margen del enlace y por consiguiente el fenómeno no llega a perturbar al enlace óptico. El resultado del software «FSO prediction» es coherente con los datos climáticos del periodo considerado.

4.1.2.3 Atenuación debida a la luz ambiente

Aparece conjunción solar cuando el sol se encuentra en el campo de visión (FOV, *field of view*) de un receptor óptico. El programa «FSO prediction» calcula, para cada minuto del año, la probabilidad de que la posición del Sol sea paralela al enlace óptico y la potencia solar que penetra en el receptor sea mayor que la recibida desde el emisor.

El «FSO prediction» define la atenuación causada por la luz ambiente mediante la siguiente fórmula (Ley 9 de Stefan):

$$F_{emis} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=+\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} d\lambda = \sigma T^4 \quad (A-4)$$

donde:

$$\begin{aligned} \lambda &: \text{longitud de onda (m)} \\ C &: \text{velocidad de la luz (} 3 \times 10^8 \text{ m/s)} \\ T &: \text{temperatura (K)} \\ K &= 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \\ \sigma &= 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4} \\ H &= 6,62 \times 10^{-34} \text{ J/s} \end{aligned}$$

En la ventana espectral del producto FSO (filtro en longitudes de onda de 720 a 950 nm) se tiene, por consiguiente:

$$F_{emis} = \int_{\lambda=720nm}^{\lambda=950nm} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1} d\lambda = 11,5 \text{ MW/m}^2$$

La determinación del nivel recibido por el receptor se lleva a cabo a partir del FOV para un valor del ángulo de visión de 5 mrd y un valor del diámetro de 100 mm (A-5):

donde:

- Diámetro al Sol: 1,4 millones de km
- Distancia Tierra-Sol: 150 millones de km

$$\theta = \arctan g\left(\frac{\text{Diámetro del Sol}/2}{\text{Distancia Tierra - Sol}}\right) \quad (A-5)$$

$$\theta = \arctan g\left(\frac{1,4/2}{150}\right) = 0,004333 \text{ rad}$$

$\theta = 4,3$ mrd (inferior a 5 mrd), por consiguiente el producto FSO recibe toda la intensidad luminosa, del Sol, en ciertas configuraciones de posición.

La estación meteorológica France indica que la máxima intensidad solar durante el periodo considerado fue $S = 3\,500 \text{ J/cm}^2$ lo que equivale aproximadamente a $1\,000 \text{ W/m}^2$.

$$C_n^2 = F_1(\text{rugosidad}) * F_2(\text{radiación solar}) * F_3(\text{humedad}) * (1 + A)$$

* Relación de pérdidas solares (espacio + atmósfera)

$$\frac{\text{Flujo luminoso total}}{\text{Flujo luminoso total en la Tierra}} = \frac{\text{Flujo luminoso filtrado}}{\text{Flujo recibido filtrado}} \quad (\text{A-6})$$

$$\frac{64 \times 10^6 \text{ Wm}^{-2}}{1\,000 \text{ Wm}^{-2}} = \frac{11,5 \times 10^6 \text{ Wm}^{-2}}{\text{Flujo recibido filtrado}}$$

Valor medio del flujo recibido filtrado: $= 180 \text{ W/m}^2$

Se considera que el flujo entrante está completamente centrado en el diodo receptor, es decir:

$$\text{Potencia recibida} = \text{Flujo recibido filtrado} * \text{Zona de recepción}, \text{ Potencia recibida} = 180 * \left(\frac{\pi}{4} * 0,1^2 \right)$$

Por consiguiente, la potencia recibida es $1,4 \text{ W}$ o $31,5 \text{ dBm}$.

Este valor debe compararse con el nivel recibido de -11 dBm o -16 dBm por el receptor FSO. El programa «FSO prediction» incide un valor de indisponibilidad de $0,000012\%$ a causa de la atenuación debida a la luz ambiente. Este valor de la potencia solar es, en algunas configuraciones de la posición del Sol, mayor que el valor recibido. Por tanto, el fenómeno repercute y perturba al enlace óptico cuando el Sol se encuentra en dirección del FOV del FSO. El resultado del programa de simulación «FSO prediction» corresponde con los datos climáticos del periodo considerado.

4.1.2.4 Efectos del centelleo

El programa «FSO prediction» define los efectos del centelleo.

La estación meteorológica France indica una máxima radiación solar e hidrometría igual a $3\,500 \text{ J/cm}^2$ (aproximadamente $1\,000 \text{ W/m}^2$) y 100% respectivamente.

Efectos del centelleo: $F1 = 8,99 \times 10^{-14}$; $R = 1\,000 \text{ W/m}^2$; $F2 = 26,6$; $H = 100$; $F3 = 0,19$; por tanto $C_n^2 = 4,5 \times 10^{-13}$

$$L = 270 \text{ m}; \lambda = 850 \text{ nm}; K = 7,4 \times 10^6; \sigma_X^2 = 1,23 \times (7,4 \times 10^6)^{7/6} \times 4,5 \times 10^{-13} \times (270)^{11/6} = 1,65$$

$$A_{ff}^{\text{Centelleo-enlace}} = 2,57 \text{ dB.}$$

Este valor es inferior al margen del enlace y por consiguiente el fenómeno no llega a perturbar el enlace óptico. Los resultados del software «FSO prediction» se corresponden con los datos climáticos del periodo considerado.

4.2 Comparación de la calidad de servicio y disponibilidad del FSO con arreglo a las Recomendaciones UIT-R

4.2.1 Comparación de la calidad de servicio del FSO con arreglo a lo dispuesto en la Recomendación UIT-R F.1668

La Recomendación UIT-R F.1668 propone un objetivo de característica de error para los enlaces inalámbricos fijos digitales reales y lo aplica a los enlaces fijos numéricos por microondas punto a punto. En ausencia de una Recomendación específica relativa al FSO, se ha utilizado dicha Recomendación. Los objetivos de la Recomendación para una red de acceso de 34 Mbit/s figuran en el Cuadro A2-3

CUADRO A2-3

Objetivo de característica de error

	Mensual	Anual
Número de ES	< 389	< 4 668
Número de SES	< 14 580	< 174 960

Los resultados de la calidad de servicio del FSOL, en los dos sentidos y durante el periodo considerado, aparecen en el Cuadro A2-4.

A partir de estos resultados y basándose en los criterios del enlace por microondas, el FSOL no está de conformidad con el criterio de calidad de servicio señalado en la Recomendación UIT-R F.1668.

CUADRO A2-4

Calidad de servicio

Mes	Sentido: De A a B				Sentido: De B a A				Resultados
	Nº de ES	Nivel	Nº de SES	Nivel	Nº de ES	Nivel	Nº de SES	Nivel	
Diciembre 04	17	SÍ	16	SÍ	120	SÍ	120	SÍ	100%
Enero 05	104	SÍ	45	SÍ	619	SÍ	619	No	75%
Febrero 05	1 048	SÍ	1 048	No	134	SÍ	134	SÍ	75%
Marzo 05	157	SÍ	154	SÍ	88	SÍ	88	SÍ	100%
Abril 05	1 688	SÍ	1 688	No	329	SÍ	329	SÍ	75%
Mayo 05	272	SÍ	264	SÍ	149	SÍ	149	SÍ	100%

4.2.2 Comparación de la disponibilidad del FSO con respecto a lo estipulado en la Recomendación UIT-R F.1703

La Recomendación UIT-R F.1703 propone un objetivo de disponibilidad para cualquier enlace inalámbrico fijo digital real perteneciente a la red de acceso y lo aplica al enlace por microondas fijo numérico punto a punto. En ausencia de una Recomendación específica relativa al FSO, se propone utilizar dicha Recomendación. Los objetivos de la Recomendación para una red de acceso de 34 Mbit/s figuran en el Cuadro A2-5.

CUADRO A2-5

Objetivo de disponibilidad

	Mes más desfavorable	Anual
Disponibilidad	> 99,4 ⁽¹⁾ (o 3 154 minutos o 189 240 s de indisponibilidad)	> 99,99 (o 53 minutos o 3 180 s de indisponibilidad)

⁽¹⁾ Basándose en una disponibilidad del 100% los 11 meses restantes.

Los resultados de la disponibilidad del FSOL, en los dos sentidos y durante el periodo considerado, aparecen en el Cuadro A2-6.

CUADRO A2-6

Disponibilidad

Mes	Sentido: De A a B		Sentido: De B a A		Resultados
	Segundos	Nivel	Segundos	Nivel	
Diciembre 04	0	SÍ	0	SÍ	100%
Enero 05	1 601	SÍ	38 839	No	50%
Febrero 05	232	SÍ	0	SÍ	100%
Marzo 05	13	SÍ	0	SÍ	100%
Abril 05	818	SÍ	0	SÍ	100%
Mayo 05	0	SÍ	0	SÍ	100%

A partir de estos resultados y basándose en el criterio del enlace de microondas, el FSOL no está de conformidad con los criterios de disponibilidad dispuestos en la Recomendación UIT-R F.1703.

4.3 Comparación de la disponibilidad del FSOL con respecto al software «FSO prediction»

Los resultados de la simulación «FSO prediction» se comparan con la disponibilidad del FSOL registrada durante seis meses y se presenta en el Cuadro A2-7.

CUADRO A2-7

Predicción del FSO

	Mes más desfavorable	Anual	Resultados
Predicción FSO	96,9849%	99,3037%	Correctos
Enlace FSO	98,5016% ⁽¹⁾	99,8768% ⁽²⁾	Correctos

⁽¹⁾ Proyección anual

⁽²⁾ Basado en la indisponibilidad más intensa

Los resultados del software «FSO prediction» se corresponden y son algo más pesimistas que la disponibilidad del FSOL durante el periodo considerado con un valor inferior al 0,58% a lo largo del año y del 1,56% en el mes más desfavorable.

Observaciones y comentarios

- Cabe señalar que la diferencia del margen (5 dB) entre los dos sentidos del enlace óptico es perfectamente visible en los resultados de la disponibilidad.
- El humo procedente de una chimenea ubicada en el techo de un edificio A y procedente de las cocinas a veces llega a obstruir el enlace óptico pero este problema surgió para configuraciones muy precisas (temperatura, dirección y velocidad del viento ...) y no fue cuantificado.

- La salida y la puesta del Sol también pueden obstruir al enlace óptico y el software «FSO prediction» así lo indica, pero los problemas causados serían menos frecuentes.
- Las personas situadas en torno al emplazamiento de experimentación han confirmado valores de visibilidad de carácter excepcional (niebla) durante el periodo de prueba (importantes fenómenos de niebla en 2005 no percibidos desde al menos 1995). Por consiguiente, conviene actualizar a intervalos regulares los datos meteorológicos del software «FSO prediction».

5 Conclusiones

En primer lugar, el experimento de enlace óptico hizo posible lograr los dos objetivos:

- Confrontar los resultados con el software «FSO prediction»:
 - El análisis estadístico de la interrupción del enlace óptico debido a la niebla puso en evidencia la mayor precisión de los modelos integrados en el software.
 - La síntesis de los datos de prueba para los otros fenómenos de atenuación es coherente con los resultados del software.
 - Los resultados del software sobre disponibilidad se corresponden y son algo más pesimistas que la realidad del FSOL.
- Confrontar los resultados del FSOL con los objetivos de las Recomendaciones UIT-R basándose en los criterios del enlace de microondas:
 - Los resultados del enlace óptico no están de conformidad con la Recomendación UIT-R F.1703, Objetivos de disponibilidad para enlaces inalámbricos fijos digitales reales utilizados en las conexiones ficticias de referencia y trayectos ficticios de referencia de 27 500 km.
 - Los resultados del enlace óptico no están de conformidad con la Recomendación UIT-R F.1668, Objetivos de característica de error para los enlaces inalámbricos fijos digitales reales utilizados en las conexiones ficticias de referencia y trayectos ficticios de referencia de 27 500 km.

Referencias

- [BOU 06] Olivier BOUCHET y otros [2006] *Free-space Optics: Propagation and Communication*. ISTE Publishing Company. ISBN: 1905209029.
- [FSO 04] <http://www.francetelecom.com/en/>.
-