

**II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



XVIII Simposio Internacional de Ingeniería Eléctrica “SIE 2019”

Título

Evaluación práctica de un enlace óptico en el espacio libre (FSO) con datos de un fabricante. Cálculo y simulación.

Title

Practical evaluation of free space optical link (FSO) using data from one equipment provider. Calculation and simulation.

José Andrés de León Galbán¹

Dr. C. Miguel Arturo Mendoza Reyes²

1- Etecsa, Cuba. E-mail: joseandres.deleon@etecca.cu

2- Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Cuba. E-mail: mmendoza@uclv.edu.cu

Resumen:

La decisión de usar tecnología FSO se ve afectada por una componente de pérdidas impredecible, la atmósfera. Los proveedores de equipos ofrecen datos de explotación con parámetros que usualmente están por debajo de las capacidades reales de estos enlaces para garantizar una alta disponibilidad. El presente trabajo toma datos prácticos que demuestran la factibilidad del empleo de esta tecnología en Cuba. Empleando los métodos de Análisis– Síntesis y de inducción-deducción fundamentalmente se hizo una búsqueda actualizada de estudios sobre las condiciones atmosféricas en Cuba, determinantes para este tipo de enlace, se seleccionó un producto típico del mercado, se calculó el margen de enlace para condiciones de explotación aceptables y se realizaron varias simulaciones. Se propone un mapa donde aparecen las zonas en Cuba donde se recomienda fuertemente usar esta tecnología y se muestra donde no es recomendable.

Información de contacto

convencionuclv@uclv.cu

www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



Abstract:

The decision to use FSO technology is affected by an unpredictable loss component, the atmosphere. FSO equipment providers offer exploitation data with parameters that are usually below the actual capabilities of these links to ensure high availability. The present work use practical data to demonstrate the feasibility of using this technology in Cuba. Using the methods of Analysis-Synthesis and induction-deduction, an updated search of the important atmospheric conditions for this type of link in Cuba was made, a typical product was selected from the market, the link margin was calculated for acceptable operating conditions and several simulations were carried out. A map is proposed showing the zones in Cuba where it is strongly recommended to use this technology and where it is not recommended.

Palabras Clave: FSO; óptica en el espacio libre

Keywords: FSO; free space optical

1. Introducción

Las comunicaciones ópticas inalámbricas aparecieron y han sido utilizadas desde hace siglos, sin embargo, su desarrollo e implementación se han demorado producto del descubrimiento de otras técnicas de transmisión que han sido explotadas e implementadas mayormente como la electricidad por cobre y la fibra óptica. El descubrimiento del láser semiconductor, la baja atenuación de la fibra óptica, permitieron en un principio desarrollar la comunicación a través de la fibra óptica y luego surgió el interés por la comunicación de haces de luz por el espacio

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



libre, principio de las comunicaciones por espacio libre o FSO por sus siglas en inglés (Free Space Optics) (Ing. Christian Andrés Cuenca, 2009)

En los últimos años, los sistemas de comunicaciones FSO se han convertido en una alternativa eficiente para la comunicación de largo alcance de punto a punto debido a su bajo costo de implementación, alto ancho de banda, alta seguridad y por utilizar un espectro sin licencia. Se suma a esto, el hecho de que no requiere de construcciones civiles ya sea edificios, bajo tierra o áreas rurales y/o urbanas donde es difícil y costoso desplegar fibras (Gour Chandra Mandal, 2018). FSO se utiliza desde hace unos años con éxito en diversas aplicaciones, incluidas las comunicaciones celulares (G. Katz, 2006), la comunicación entre satélites (M. Gregory, 2012), el espacio profundo, las salas de exposiciones y en las comunicaciones terrestres (Dong-Yiel Song, 2000).

El principal desafío del sistema FSO para comunicaciones exteriores es superar el rendimiento y mitigar la degradación causada por la atenuación atmosférica y la turbulencia (Gour Chandra Mandal, 2018). Hoy en día existen diversas líneas de investigación y desarrollo encaminadas fundamentalmente a minimizar los efectos negativos de las condiciones atmosféricas adversas que afectan estos enlaces fundamentalmente la niebla.

El planeamiento de enlaces FSO parte de las necesidades de transferencia binaria y el grado de servicio que se requieren, se suma a esto la ubicación del emplazamiento que determinará la dirección del enlace. Tomando en consideración estos elementos primarios y la disponibilidad de equipos que hay en el mercado, se puede calcular el presupuesto del enlace dejando a los fenómenos aleatorios algún peso que dependerá de diversos factores.

Según estudios recientemente publicados, a partir de los registros de código de estado de tiempo presente para todas las estaciones meteorológicas de Cuba usando como periodo base 1989 – 2010, se han determinado los parámetros de por ciento de ocurrencia de observaciones y número promedio anual de días con ocurrencia de algunos fenómenos meteorológicos de interés para el uso de FSO. Según este estudio, los “cielos despejados” y las “brumas”

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



presentan los por cientos de ocurrencia de observaciones más altos para todo el país y sus zonas de máxima y mínima ocurrencia son contrarias ya que donde hay máximas para los “cielos despejados” como en Pinar del Río, Ciego de Ávila y Camaguey son mínimas para las “brumas”. Las observaciones con “humo” son solo significativas para Casablanca, donde hay un máximo absoluto y para Nuevitas en la provincia Camaguey asociadas al desarrollo industrial en esas regiones. Las “nieblas” y las “neblinas” son características del interior de las provincias de La Habana, Artemisa y Mayabeque, de lugares montañosos y de la desembocadura del Río Cauto, asociadas a zonas de altos niveles de humedad (Lourdes Álvarez-Escudero, 2018).

El presente trabajo muestra un ejercicio de simulación teniendo en cuenta el comportamiento de la atmósfera en nuestro país y el estado actual del equipamiento disponible en el mercado para comunicaciones ópticas en el espacio libre.

2. Metodología

La base fundamental de información utilizada en el presente trabajo la constituyeron publicaciones científicas, en su mayoría de los últimos 5 años en el ámbito de la meteorología y las telecomunicaciones. Se emplearon además documentos técnicos de fSONA, prestigioso fabricante de dispositivos FSO. De este proveedor se seleccionó el modelo de telescopio 1250-Z.

2.1. Comportamiento en Cuba de los fenómenos meteorológicos considerados en este estudio.

La ocurrencia de “cielos despejados” en nuestro país oscila entre 0.08 % y el 84.8 % según estudios recientes. Los días catalogados como “cielos despejados” presentaron máxima ocurrencia para regiones que abarcan las provincias de Pinar del Río, Ciego de Ávila y Camaguey. Este fenómeno es el que presenta el máximo número de estaciones para el rango

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



de “Muy frecuente” con el 21%. No se conoce una causa que justifique la forma de distribución de este fenómeno (Lourdes Álvarez-Escudero, 2018).

Para FSO, el cielo totalmente despejado durante el día tiene como impacto fundamental el efecto de la radiación de fondo producto de la incidencia de la luz solar en el enlace. En las comunicaciones ópticas en el espacio libre (FSO), existen condiciones bajo las cuales los enlaces láser sufren los efectos de la radiación solar de fondo (SBR). Estas condiciones se agrupan en cuatro tipos (Sidorovich, 2003):

- La luz directa del sol golpea el foto-detector.
- Luz solar reflejada (destellos)
- Luz solar dispersada por hidrometeoros.
- Luz solar dispersada por objetos circundantes (paredes, etc.)

La luz solar directa puede provocar la interrupción total de las comunicaciones (interrupción del enlace) y, por lo tanto, afectar su disponibilidad. Sin embargo, el tiempo total de indisponibilidad de un enlace FSO por año determinado por la radiación solar de fondo es al menos un orden de magnitud menor que el tiempo durante el cual el mismo enlace no está disponible debido a condiciones meteorológicas desfavorables que causan una atenuación demasiado fuerte de la radiación láser a lo largo de la ruta de comunicación (el factor principal es la niebla, que en diferentes regiones y para diferentes distancias operativas causa un promedio de probabilidad de indisponibilidad de enlace de un año de aproximadamente 0,001% a 1% (Sidorovich, 2003). Además, la orientación del enlace puede mitigar casi completamente el efecto de la radiación solar de fondo si se tiene en cuenta realizarlos en la dirección Norte – Sur.

En la distribución espacial por rangos de la frecuencia de ocurrencia de observaciones con “brumas” los valores de frecuencia de ocurrencia variaron entre 0% que se reporta en la estación de Palo Seco y 82.3%. El 56% de las estaciones presentaron valores en el rango de “Medianamente frecuente” y solo un 5% de las estaciones se hallaron en las categorías de

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



“Frecuente” y “Muy frecuente”, aunque en promedio la ocurrencia de brumas con respecto a todas las observaciones de tiempo presente es alta, con un 33% del total de registros. La distribución mostró zonas de muy poca ocurrencia para las provincias de Pinar del Río, Ciego de Ávila y Camagüey, justo donde son muy ocurrentes los cielos despejados y aunque no existe a conocimiento de los autores, una causa física para este comportamiento, si puede conjeturarse que las bajas frecuencias de los valores de brumas en las zonas mencionadas está relacionado con la alta ocurrencia de reporte de cielos despejados (Lourdes Álvarez-Escudero, 2018).

Las “neblinas” ocuparon como promedio el 6.39 % del total de observaciones para todo el país y sus valores estaban en el rango entre 0.01 y 38%. El 71% de las estaciones se agruparon en la categoría “Poco frecuente” y solo 4 estaciones pertenecen a las categorías de “Frecuente” y “Muy frecuente”. Las estaciones con mayores por ciento fueron, en ese orden, Topes de Collantes en Sancti Spiritus y Jucarito en Granma, seguidas en la categoría “Frecuentes” por Güira de Melena en Artemisa y Bainoa en Mayabeque. La distribución espacial para todo el país muestra zonas de máxima ocurrencia en el interior de las provincias La Habana, Artemisa y Mayabeque, zona llana, en la mencionada Topes de Collantes, zona montañosa y en áreas de la desembocadura del río Cauto y de la ladera norte de la Sierra Maestra (Lourdes Álvarez-Escudero, 2018).

Las “nieblas” por su parte presentan bastante baja ocurrencia con un promedio para todo el país de 1.28%, aunque en localidades específicas pudo estar por encima del 15% de las observaciones. El 75% de las estaciones estuvieron en el rango de “muy poco frecuente” y el 13% en el de “poco frecuente”. Las estaciones de La Piedra, La Palma, Bahía Honda y Jamal no tuvieron reportes de nieblas, mientras Indio Hatuey, Palenque de Yateras, Bainoa y Gran Piedra donde son máximas, presentaron valores en la categoría de “Muy frecuente”. La distribución espacial muestra zonas de máximo en la llanura Habana – Matanzas, en áreas montañosas del extremo oriental del país y Topes de Collantes. La Isla de la Juventud, aunque

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



en la categoría “poco frecuente”, mostró valores más altos alejados de las costas. (Lourdes Álvarez-Escudero, 2018)

A modo de conclusión, el estudio de distribución espacial de fenómenos meteorológicos en Cuba muestra que como promedio para todo el país se producen 21.4 días con nieblas al año y el 66% de las estaciones meteorológicas se agruparon en las categorías de “muy poco frecuente” y “poco frecuente” y solo un 6% en las categorías de “frecuente” y “muy frecuente” (Lourdes Álvarez-Escudero, 2018).

Los efectos negativos de la niebla en los enlaces FSO se han estudiado profusamente. Algunos autores plantean que el efecto de la niebla para las longitudes de onda del infrarrojo es comparable a los del fading que provoca la lluvia en los enlaces de microondas. Teniendo en cuenta que es un componente más de la atmósfera que se mezcla con la estructura química por demás variable de esta, se ha tendido a asociar y estimar las pérdidas que provoca en decibeles en una relación inversa con la visibilidad, aspecto que históricamente se ha empleado en la navegación tanto terrestre como aérea fundamentalmente.

Si un sistema de transmisión en el espacio libre, se propone en aplicaciones de telecomunicaciones a la altura de los estándares actuales, habrá requisitos de disponibilidad muy alta. Si el margen del enlace del sistema para la atenuación atmosférica es de 30 dB (valor típico), entonces el rango máximo del enlace tendrá que ser de 100 m o menos para superar siempre las nieblas más pesadas de 300 dB / km. Este es un caso realmente extremo. Al intercambiar más margen de enlace y, por lo general, menos clima extremo, el requisito del rango de enlace láser puede extenderse ligeramente. Sin embargo, para satisfacer los requisitos de disponibilidad de las telecomunicaciones, los rangos de los enlaces láser aún tendrán que ser muy cortos, del orden de menos de 500 m, o estar respaldados por enlaces de ondas de microondas o milimétricos de menor velocidad de datos (Isaac I. Kim, 2007).

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



Para estos enlaces cortos de láser (<500 m), la niebla pesada son las condiciones climáticas principales que pueden causar cortes del enlace. Esto se demuestra en la Figura 1 (Isaac I. Kim, 2007).

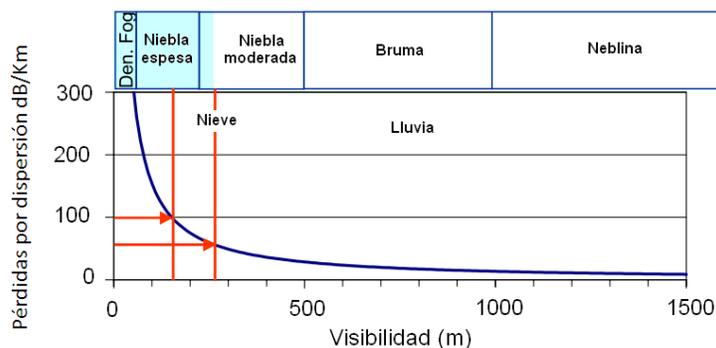


Figura 1 Condiciones meteorológicas y visibilidad en función de la distancia. Fuente (Isaac I. Kim, 2007)

La definición técnica de visibilidad o rango visual es la distancia a la que la luz disminuye al 2% de la potencia original, o cualitativamente, la visibilidad es la distancia a la que es posible distinguir un objeto oscuro contra el horizonte. La curva de atenuación-visibilidad de la figura 1 está calculada para un haz de luz de 785 nm (Isaac I. Kim, 2007). También se muestran en la Figura 1 las condiciones meteorológicas descriptivas que se asocian comúnmente con la visibilidad. Por ejemplo, niebla espesa se define como la condición meteorológica donde la visibilidad es de entre 50 y 250 m. Los márgenes de enlace típicos para la atenuación atmosférica pueden ir de 30 dB a 50 dB a un rango de enlace de 500 m para sistemas de alta velocidad. 50 dB de margen de enlace a 500 m corresponde a 100 dB / km de atenuación atmosférica admisible. Esto corresponde al clima con una visibilidad de 150 m (niebla espesa), una atenuación superior a 100 dB / km (visibilidad de menos de 150 m) eliminará el enlace del láser. Un sistema con un margen de enlace atmosférico de 30 dB a un rango de 500 m comenzará a desvanecerse en condiciones meteorológicas que se atenúan a velocidades de 60 dB / km o con una visibilidad inferior a 270 m (Isaac I. Kim, 2007).

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

**II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



Varios autores hacen referencia a formulaciones que tienen en cuenta las atenuaciones por esta causa en el coeficiente de atenuación por dispersión atmosférica (σ) que se expresa en dB/km. La más usada en la literatura consultada es la siguiente:

$$\sigma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550 \text{ nm}} \right)^{-q} \quad [1]$$

dónde: σ : es el coeficiente de atenuación atmosférica (por dispersión)

V: Visibilidad en Km

λ : longitud de onda en nm

q: distribución del tamaño de las partículas dispersantes que depende de la visibilidad de la siguiente manera:

= 1.6 para visibilidad alta ($V > 50 \text{ km}$)

= 1.3 para visibilidades medias ($6 \text{ km} < V < 50 \text{ km}$)

= $0.585 V^{\frac{1}{3}}$ para visibilidad baja ($V < 6 \text{ km}$)

Dado que esta ecuación muestra la atenuación atmosférica como una función de la longitud de onda, se ha usado para mostrar que hay menos atenuación o dispersión usando luz de 1550 nm en comparación con luz de 785 nm en cualquier clima. Otros estudios han mostrado que considerando los cálculos completos de la teoría de Mie y otros datos experimentales muestran que en la niebla, no hay una dependencia de la longitud de onda a la atenuación atmosférica y que en presencia de neblina, la atenuación atmosférica aumenta a medida que disminuye la longitud de onda. El impacto que tiene esta conclusión solamente modifica el factor q (distribución del tamaño de las partículas dispersantes) considerándose entonces la siguiente distribución:

q = 0 para niebla ($V < 500 \text{ m}$)

= $V - .5$ para bruma ($500 \text{ m} < V < 1 \text{ km}$)

= $0.16 V + 0.34$ para neblina ($1 \text{ km} < V < 6 \text{ km}$)

El siguiente cuadro muestra valores típicos comparando ambos métodos de estimación.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

**II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



Visibilidad (km)	dB/km en 785 nm	dB/km en 1550 nm	dB/km en 785 nm	dB/km en 1550 nm	Tiempo
	estimando q con el primer método		estimando q con el segundo método		
0,05	315	272	340	340	Niebla (de espesa a moderada)
0,2	75	60	85	85	
0,5	29	21	34	34	
1	14	9	14	10	Bruma
2	7	4	7	4	Neblina
4	3	2	3	2	
10	1	0,4	1	0,4	Claro
23	0,5	0,2	0,5	0,2	

Cuadro 1. Pérdidas atmosféricas (en dB / km) en función de la visibilidad para 785 nm y 1550 nm calculada utilizando dos expresiones para q. Fuente: elaboración propia.

Estimaremos en nuestro estudio el peor caso que se expresa en el segundo método de estimación de q. Se estimarán tres escalones de pruebas, uno con niebla moderada (visibilidad 1 km y atenuación 10 dB/km), una segunda con visibilidad 4 km (2 dB/km) y una tercera con visibilidad superior a los 20 km (0.2 dB/km). En todos los casos se sumará la atenuación que el fabricante considera para un día claro a cada una de las tres escalas de visibilidad propuestas (1 km, 4 km y más de 20 km).

2.2. SONAbeam 1250-Z

La serie Z de fSONA está concebida para proporcionar una solución liviana y económica para enlaces de corta distancia. Es ideal para enlaces de alta capacidad hasta 500 metros. El SONAbeam Z se aloja en un gabinete de aluminio de bajo perfil, adecuado para operaciones en exteriores en todos los ambientes climáticos, así como para instalaciones en interiores que operan a través de una ventana. Con una latencia y pérdida de paquetes cercanas a cero, el SONAbeam Z transmite Gigabit Ethernet nativo full-duplex y también puede operar en modo transparente de protocolo para admitir datos personalizados o transportar tráfico TDM e IP

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



en el mismo enlace. El siguiente cuadro muestra las características técnicas de esta serie disponibles en la web del fabricante.

Free-Space Optical	1250-Z ¹	2500-Z ²
<i>Datarate/protocol:</i>	Fast Ethernet: 125 Mbps, full duplex; OC-3/STM-1: 155 Mbps, full duplex Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps, full duplex; OC-12/STM-4: 622 Mbps, full duplex CPRI 1/CPRI 2	Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps, full duplex; OC48/STM16, 2.5 Gbps, full duplex CPRI 2/CPRI 3
<i>Range: 3 dB/km (clear air):</i>	50 m to 500 m (160 ft to 0.3 mi)	50 m to 500 m (160 ft to 0.3 mi)
<i>10 dB/km (extreme rain):</i>	50 m to 350 m (160 ft to 0.2 mi)	50 m to 350 m (160 ft to 0.2 mi)
<i>Laser output power:</i>	160 mW peak	160 mW peak
<i>Receive aperture:</i>	50 mm (2 in) diameter	50 mm (2 in) diameter
<i>Free-space wavelength:</i>	1550 nm	1550 nm
Interface Options	1000-Base-SX (850 nm)	1000-Base-LX (1310 nm)
<i>Data physical interface:</i>	Multimode fiber, LC	Singlemode fiber, LC
<i>Fiber xmtr/rcvr wavelength:</i>	850 nm nominal	1310 nm nominal
<i>Fiber xmtr output power:</i>	-9 dBm (min), -3 dBm (max)	-11 dBm (min), -3 dBm (max)
<i>Fiber rcvr input power:</i>	0 dBm (min), -17 dBm (max)	-20 dBm (min), -3 dBm (max)
Mechanical / Electrical / Environmental		
<i>Operating temperature:</i>	-40°C to 60°C (-40°F to 140°F)	<i>Dimensions (W*H*D):</i> 25 x 33 x 46 cm; 10 x 13 x 18 in
<i>Pointing stability:</i>	120 kmh/75 mph operating, >160 kmh/100 mph survival	<i>Weight:</i> 10 kg (22 lbs)
<i>Environmental seal:</i>	Water-tight, IP66/NEMA-4 Cert.	<i>Input voltage:</i> -48 VDC (-40 V to -57 V) or 100-240 VAC
		<i>Power consumption:</i> 25 watts (no heater)
Carrier-Class Reliability and Durability		
<i>Laser cooling:</i>	Active solid state cooling to 35°C (95°F)	<i>Power supply:</i> Telco grade, >550,000 hour
<i>Structure:</i>	Aluminum housing	
Element Management and Control		
<i>Management interface:</i>	USB, Serial & 10/100-baseT	<i>GUI control program:</i> SONAbeam Terminal Controller
<i>SNMP:</i>	Embedded v.1 agent	<i>Command line interface:</i> Via USB, RS232 or IP address
<i>Key parameters monitored:</i>	Receive signal strength; Power supply currents & voltages; Laser currents, power levels & temperatures; Internal temperature; Clock recovery / sync status; Network interface signal status	
<i>Historical logging:</i>	Internal data and event logging	
Certifications & Classifications	International	US/Canada
<i>Laser safety</i>	IEC 60825-1, Class 1M EN 55022 - emissions	CDRH 21 CFR including Laser Notice 50, Class 1M; ANSI Z136.1 & Z136.6, Class 1
<i>EMC</i>	EN 55024 - immunity	FCC - Pat 15 / ICES - 003
<i>Electrical</i>	EN 60950 (CB scheme)	UL 60950 / CSA 60950

Cuadro 2. Características técnicas de la serie Z de los telescopios fSONA. Disponible en www.fsona.com

Nótese que el proveedor ofrece pocos datos y se requiere suponer varios parámetros en el simulador. Fue necesario consultar la literatura buscando valores típicos de sensibilidad del

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



receptor (-26.989 dBm) y divergencia del haz (1 mrad). Solamente la potencia del transmisor (160 mW) y la apertura del receptor (50 mm) se pueden introducir en el simulador siguiendo datos del fabricante. También se emplearon en la simulación los valores propuestos de explotación como longitud de onda del enlace (1550 nm) y velocidad binaria de (1.25 Gbps). En estas condiciones el suministrador de los equipos ofrece garantía de calidad y estabilidad del enlace. Nótese que el proveedor supone una pérdida de 3 dB/km en aire claro donde garantiza entre 50 m y 500 m mientras que con lluvia extrema supone pérdidas de 10 dB/km garantizando un enlace con alcance entre 50 m y 350 m, estos valores de pérdidas que introduce el canal FSO no son utilizados en la simulación, en su lugar se emplean los valores del cuadro 1 sumados a los 3dB/km que el proveedor considera para un día claro.

2.3. Formulaciones

Según la recomendación UIT-R P.1814, el margen de enlace para FSO se calcula como sigue:

$$\text{Menlace} = P_e - S_r - A_{geo} - A_{atmo} - A_{centelleo} - A_{sistema} \quad (2)$$

Para nuestro ejemplo, la potencia del transmisor (P_e) = 19.389 dBm y la sensibilidad del receptor (S_r) = -26.989 dBm. Las atenuaciones adicionales del sistema se pueden considerar 1 dB y solo quedan por calcular las atenuaciones geométricas, atmosféricas y por centelleo, esta última se desprecia y se considera como parte de la atenuación atmosférica. La atenuación geométrica, por su parte, se calcula como sigue:

$$A_{geo}(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{S_d}{S_{captura}} \right) \quad (3)$$

La superficie de captura es típicamente 0.025 según literatura consultada. La superficie del haz de transmisión a la distancia d (S_d) se calcula como:

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

**II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



$$S_d = \frac{\pi}{4}(d \cdot \theta)^2 \quad (4)$$

Θ (divergencia) se supone de 1 mrad y solamente nos queda pendiente definir la distancia del enlace.

La atenuación atmosférica se calcula como:

$$A_{\text{atmosférica}} = A_{\text{cielo despejado}} + A_{\text{exceso}} \quad (5)$$

Haciendo varias iteraciones, se concluyó que con 5000 m de rango del enlace se tiene aún margen de enlace disponible, para este caso, sustituyendo valores en la ecuación 2:

$$\text{Menlace} = 19.4 \text{ dBm} + 27 \text{ dBm} - 28.8 \text{ dB} - 16 \text{ dB} - 1 \text{ dB} = 0.6 \text{ dB}$$

Esto significa que el enlace puede ser explotado hasta 5 km aproximadamente.

2.4. Simulación.

La información disponible en el *datasheet* del modelo específico fue introducida en el simulador Optisystem del proveedor Optiwave en su versión 15 (ultima disponible), este simulador es muy empleado según la literatura consultada. A continuación, se muestran los valores introducidos en el simulador.

En el transmisor	En el Receptor	En el canal FSO
Bit rate: 1.25e+009 bit/s	Photodiode: PIN	Additional losses: 1 dB
Sequence length: 128 Bits	Sensitivity: -26.9 dBm	Geometrical loss: Considerar
Symbol rate: 1.25e+009 symbols/s		Tx aperture diam.: 5 cm
Reference wavelength: 1550 nm		Beam divergence: 1 mrad
Modulation type: NRZ		Transmitter loss: 1 dB
Power: 160 mW		Rx aperture diam.: 50 cm
Extinction ratio; 10dB		

Cuadro 3. Valores introducidos en el simulador.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



El esquema de simulación empleado es muy simple y se muestra en la figura 2. Además de los tres elementos esenciales, transmisor, receptor y canal FSO se agregan otras herramientas de medición y análisis como un analizador de espectro óptico, medidores de potencia óptica, un analizador de BER y un analizador del diagrama de ojo

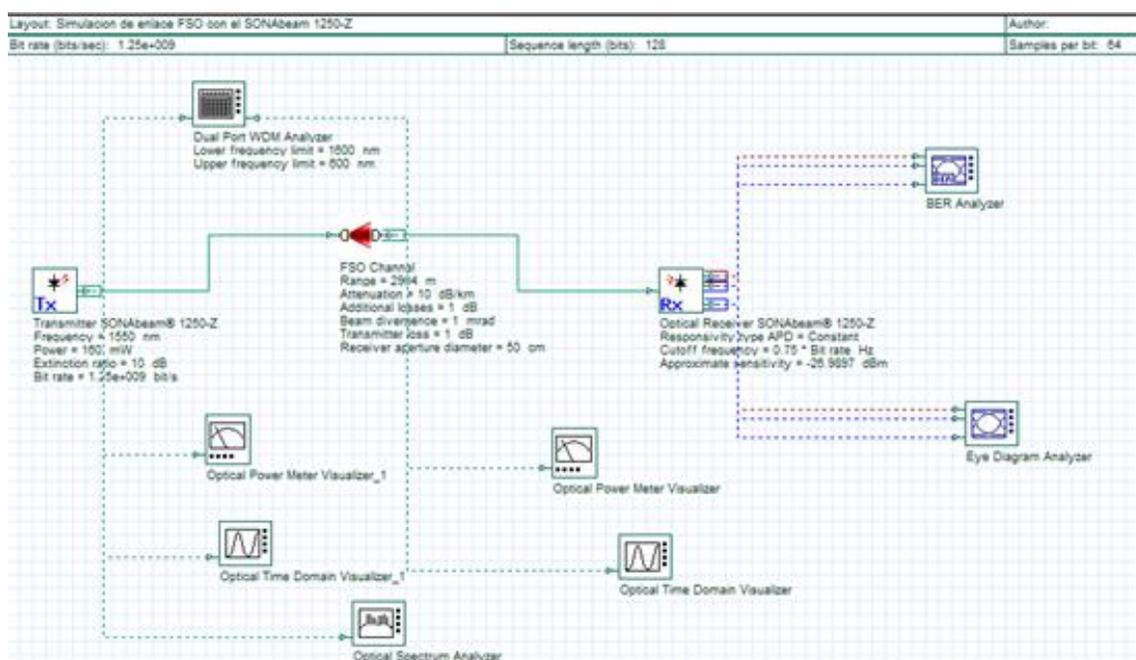


Figura 2. Esquema de simulación en Optisystem 15

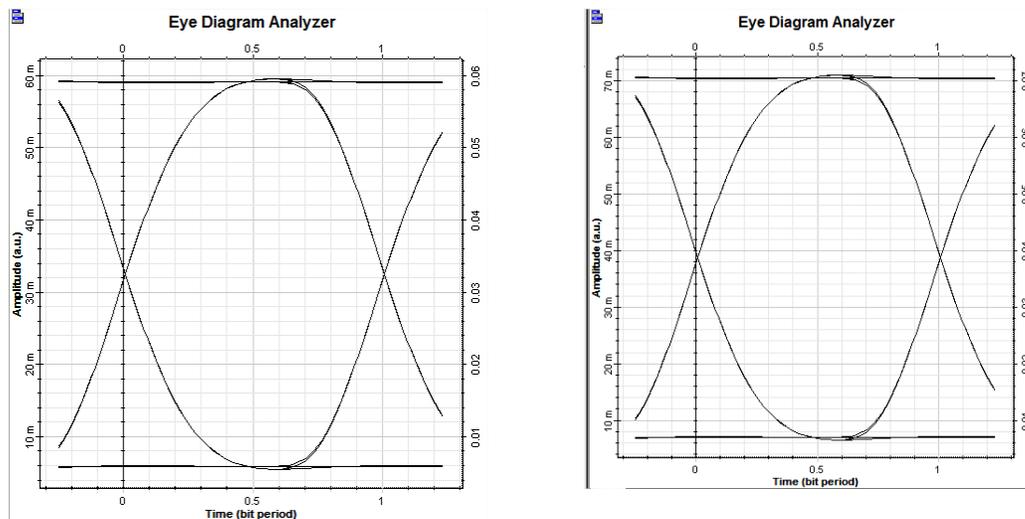
En el canal FSO se fueron introduciendo valores de atenuación (parámetro *Attenuation* de la ventana principal de configuración de este objeto) en dB/km y de distancia del enlace (parámetro *Range* de la ventana principal de configuración de este objeto) en metros.

Suponiendo que el enlace se somete a las condiciones y valores propuestos por el fabricante de los telescopios (día claro 3dB/km de pérdidas y día extremadamente lluvioso 10 dB/km) y usamos el enlace con los límites que garantiza (500 m y 350 m respectivamente) obtendremos el siguiente diagrama de ojo en el receptor

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL "II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



a) Alcance 500 m pérdidas de 3 dB/km

b) Alcance 350 m pérdidas de 10 dB/km

Figura 4. Simulación con condiciones propuestas por el fabricante.

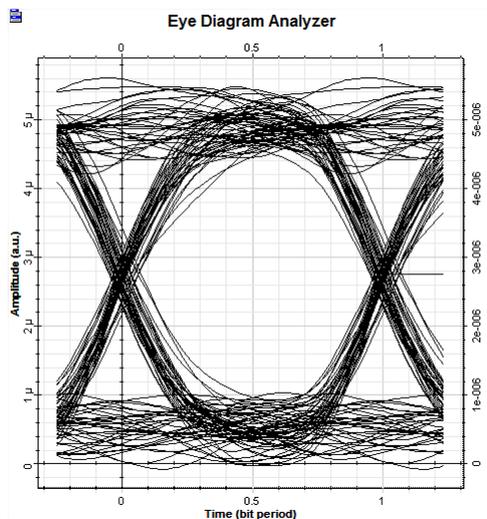
Nótese que son diagramas prácticamente ideales. Para el caso de pérdidas de 10 dB/km, como el alcance del enlace es menor (350 m), las condiciones de la señal para el receptor son incluso mejores. En estos dos casos, el valor del BER es de 0 según los resultados de la simulación. Si mantenemos esta atenuación de 10 dB/km que el fabricante supone para lluvia extrema, el enlace puede llegar a tener un rango de hasta 2800 m (2.8 km) sin que el valor del BER supere el rango de 10^{-22} lo cual es aceptable en un enlace. La siguiente figura muestra el diagrama de ojo para esta simulación. El mínimo valor de BER para este caso es de $1.657e^{-022}$

En estas condiciones la potencia óptica está muy cerca del valor de sensibilidad del receptor (-25.728 dBm), sin embargo, el diagrama de ojo está bien definido.

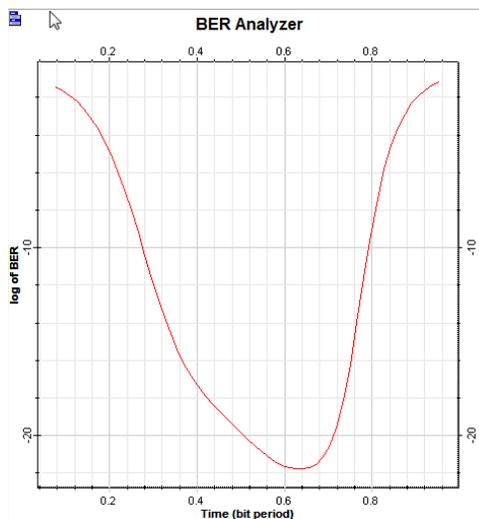
Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL
 “II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
 CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



a) Diagrama de ojo



b) Analizador del VER

Figura 5. Simulación con 10 dB/km de pérdida atmosférica y un rango de 2800 m.

Si se asumen 3 dB/km como pérdida por absorción atmosférica (el fabricante del telescopio seleccionado lo considera como atenuación en días claros) y se le suman los valores de atenuación del cuadro 1 para tres situaciones básicas de tiempo atmosférico se obtiene de las simulaciones el cuadro siguiente.

Visibilidad (km)	Atenuación (dB/km)	Rango máximo del enlace para BER aceptable (m)	BER para el rango máximo	Potencia en el receptor (dBm)
1 (bruma)	13	2300	$1,79 \cdot 10^{-20}$	-25.9
4 (neblina)	5	4700	$4,07 \cdot 10^{-23}$	-25.7
20 (día claro)	3,2	6500	$3,05 \cdot 10^{-22}$	-25.76

Cuadro 4. Rangos de enlace con razón de bits erróneos aceptables para distintos valores de visibilidad (atenuación). Valores simulados.

Los valores mostrados en el cuadro 4 son extremos para esas condiciones. Un enlace real debe ser explotado por debajo de estas condiciones para garantizar que la potencia en el receptor no esté tan cerca del valor de la sensibilidad. Un rango aceptable puede ser de 5000 m donde, para días claros (el 85% de los días del año en algunas zonas de Cuba) la potencia en recepción es de -18.7 dBm, el BER es prácticamente cero y el diagrama de ojo es el mostrado en la figura siguiente.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

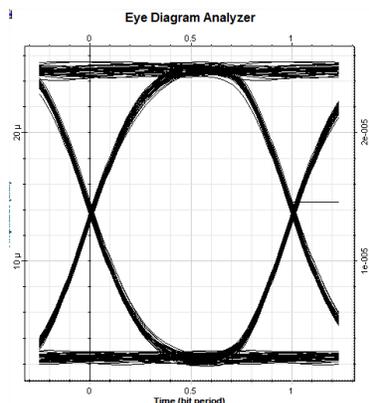


Figura 6. Simulación con 3,2 dB/km de pérdida atmosférica y un rango de 5000 m. Condiciones aceptables de explotación del modelo 1250-Z del fabricante fSONA.

Las simulaciones confirman lo calculado anteriormente. En la simulación se consideró la pérdida geométrica y pérdidas adicionales para todos los casos.

3. Resultados y discusión

En Cuba, el cielo está despejado entre el 55 % y el 85 % del total de días en el año en las zonas verdes que aparecen en el mapa de la figura 7. En estas zonas se pueden usar los enlaces FSO y se estima que las pérdidas por fenómenos adversos de la atmósfera son mínimos por la baja frecuencia de probabilidad de estos. Por otro lado, en Cuba los territorios que presentan nieblas consideradas las más frecuentes, solamente aparecen entre el 3 % y el 24 % del total de días en el año. En estas zonas no es recomendable usar enlaces del tipo FSO a menos que se haga en las condiciones estrictas propuestas por los fabricantes y suponiendo una tolerancia a cortes de enlaces (admitido en el acuerdo de servicios para la disponibilidad del enlace). El resto de las zonas en Cuba pudiera usarse la tecnología por encima de lo propuesto por el fabricante, pero sin llevar el emplazamiento a extremos como los propuestos en el presente trabajo. En todos los casos, la dirección del enlace debe ser norte – sur o estimar también cortes de enlace por el efecto de la interferencia solar de fondo, pero para esto existen métodos y herramientas capaces de estimar los momentos en que se puede producir dicha

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



afectación y la duración de la misma considerando que se debe al movimiento de la tierra alrededor del sol y su efecto para cada punto del globo terráqueo (longitud y latitud).

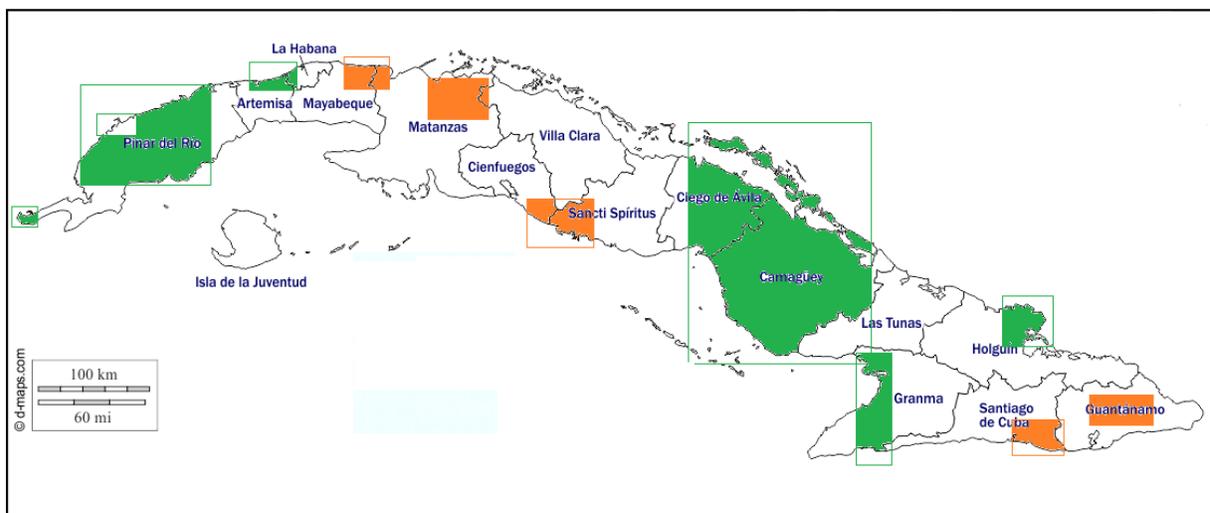


Figura 7. Distribución geográfica de las áreas donde es muy recomendable usar FSO (color verde) y donde no es recomendable (color naranja). Fuente: Elaboración propia

Tanto los cálculos como las simulaciones demostraron que bajo condiciones normales se puede explotar el par de telescopios 1250-Z del fabricante fSONA hasta diez veces la distancia propuesta por el mismo manteniendo valores de tasa de bits errados y potencia en el receptor aceptables.

Según las simulaciones, con estos telescopios (1250-Z) se puede implementar un enlace con un rango de 5 km que estará disponible siempre que las condiciones de la atmósfera no sean extremas y esto es posible en una buena parte del territorio nacional. Si estas condiciones se degradan incluso a valores altos según nuestro clima, el enlace puede estar disponible para un rango de 2 km lo cual es también muy superior a lo propuesto por el fabricante.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



4. Conclusiones

El uso de enlaces FSO se mantiene sujeto a la predisposición negativa de los proveedores de servicio por su dependencia de fenómenos aleatorios que afectan su calidad y disponibilidad. En la actualidad se requiere de valores altos de disponibilidad de los enlaces, sin embargo, para determinadas aplicaciones se pueden tolerar ciertas pérdidas siempre que la necesidad de implementar dicho enlace esté por encima de la fiabilidad del mismo. Casos como las zonas de las ciudades con micro distritos, donde hay conglomerados de varios edificios, para el *backhaul* de radio bases y en situaciones de emergencia, esta tecnología ofrece ventajas inigualables si se comparan con enlaces de radio o de fibra óptica como solución alternativa. Estos escenarios se logran con alturas de alrededor de 10 m lo que garantiza visibilidad directa considerando la curvatura de la tierra, obviamente hay que evaluar para cada emplazamiento la presencia de obstáculos en la línea de vista. Hay regiones de Cuba con posibilidades de implementación basado en estudios del comportamiento de los fenómenos atmosféricos.

Los aspectos anteriores sumado al amplio margen con que los proveedores de equipos para soluciones FSO nos garantizan el despliegue de enlaces entre 2 y 5 km en dependencia de la calidad y disponibilidad con lo que se cubre la mayoría de los escenarios antes mencionados. El uso del simulador Optisystem es muy ventajoso puesto que antes de desplegar el emplazamiento en un escenario dado se puede tener una certeza bastante alta y que se compara con los valores calculados según las formulaciones que propone la UIT.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL “II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



5. Referencias bibliográficas

- Dong-Yiel Song, Y.-S. H., Jin-Woo Cho, Jung-Hwan Lim, Dong-Woo Lee, Jae-Seung Lee, and Youngchul Chung. (2000). 4 × 10 Gb/s terrestrial optical free space transmission over 1.2 km using an EDFA preamplifier with 100 GHz channel spacing. *Optics Express*, 7(8), 280-284.
- G. Katz, S. A., P. Goldgeier, Y. Hauptman and N. Atias. (2006). Cellular over optical wireless networks. *IEE Proc.-Optoelectron*, 153(4), 195 – 198.
- Gour Chandra Mandal, R. M. a., Binoy Das, Ardhendu Sekhar Patra. (2018). Next-generation bidirectional Triple-play services using RSOA based WDM Radio on Free-Space Optics PON. *Optics Communications*, 411, 138-142.
- Ing. Christian Andrés Cuenca, I. J. C. P. (2009). Diseño y Factibilidad de una Red Inalámbrica Óptica utilizando Tecnología FSO para la comunicación entre los edificios de la Escuela Politécnica Nacional y el Observatorio Astronómico.
- Isaac I. Kim, B. M., and Eric Korevaar. (2007). Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. *The International Society for Optical Engineerin*, 4214, 26-37.
- Lourdes Álvarez-Escudero, I. B.-M. (2018). Distribución espacial de fenómenos meteorológicos en Cuba clasificados a partir del tiempo presente I. *Revista Cubana de Meteorología*, 24(1), 95-110.
- M. Gregory, F. H., H. Kämpfner, R. Lange, M. Lutzer, R. Meyer. (2012). Commercial optical inter-satellite communication at high data rates. *Optical Engineering*, 51(3).
- Sidorovich, V. G. (2003). Solar background effects in wireless optical communications. *Sunflower Technologies Limited*.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu