



## XVII SIMPOSIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA (SIE-2017)

Generalidades de las comunicaciones ópticas en el espacio libre y factibilidad de su empleo en Cuba

*Generalities of free space optical communications and feasibility of their employment in Cuba*

### Datos del autor

Nombre y Apellidos: José Andrés de León Galbán

Institución de Procedencia: Etecsa

País: Cuba

E-mail: [joseandres.deleon@etecca.cu](mailto:joseandres.deleon@etecca.cu)

### Resumen:

Los requerimientos de velocidades binarias de los servicios de telecomunicaciones mantienen la tendencia al incremento y se extienden cada vez más exigentes hasta la última milla. Hoy las mejores prestaciones se logran con la fibra óptica que resulta costosa y a veces irrealizable por la obra civil que implica. Existe una tecnología que no requiere de un recurso artificial como medio de propagación pero que emplea la luz como soporte; la tecnología de óptica en el espacio libre (FSO por sus siglas en inglés). La atmósfera es el mayor reto y en ese sentido es importante conocerla como también es imprescindible entender las cuestiones inherentes al diseño de estos enlaces. El presente trabajo tiene como objetivo hacer un estudio sobre los dos campos antes mencionados mediante el empleo del método científico histórico lógico para contextualizar el problema de investigación, sus antecedentes y desarrollo. Al finalizar se tendrá no sólo un conocimiento básico de la tecnología y nuestro entorno sino también se determinarán las fuentes que permitirán dar continuidad al estudio. Finalmente se concluirá sobre la factibilidad de su empleo.

### *Abstract:*



*The speeds requirements of telecommunication services keep the incremental trend and extend more and more demanding until the last mile. Today the best performance is achieved with the optical fiber but it is costly and sometimes unrealizable by the civil work that implies. There is a technology that does not require an artificial resource as a means of propagation but uses light as a medium; the free space optic technology (FSO). The atmosphere is the greatest challenge for this technology and in that sense it is important to know it as well as it is essential to understand the inherent issues in the design of this type of links. This work aims to make a study of the two fields mentioned above by using the scientific historical logic method to contextualize the research problem, its antecedents and development. At the end you will have not only a basic knowledge of the technology and our environment but also determine the sources that will allow to continue the study. Finally, it will be concluded on the feasibility of its use.*

**Palabras Clave:** Comunicaciones Ópticas; Óptica en el Espacio Libre; FSO.

**Keywords:** *Optical Communications; Free Space Optical; FSO*

## 1. Introducción

No se conciben hoy en día las telecomunicaciones sin el uso de la luz como portadora de grandes volúmenes de información. La naturaleza dual del comportamiento de la luz es hoy bien conocida. Sus propiedades corpusculares nos facilitan su detección mientras que sus propiedades ondulatorias permiten su desplazamiento a grandes distancias sin depender de un medio y como tal se ha ganado su lugar en el espectro electromagnético. Hoy en día el espectro está organizado y segmentado de acuerdo a la longitud o la frecuencia de las ondas y dicho orden es una representación del desarrollo de las telecomunicaciones inalámbricas desde las ondas de radio hasta las aplicaciones con la parte visible del espectro, en pleno desarrollo en los últimos años con el Li-Fi. Las ondas luminosas se ubican en medio del espectro en una estrecha franja desde el infrarrojo hasta el ultravioleta; (1mm hasta 10nm) incluyendo esa porción visible para los humanos (entre 750 nm y 400 nm), ver Figura 1.

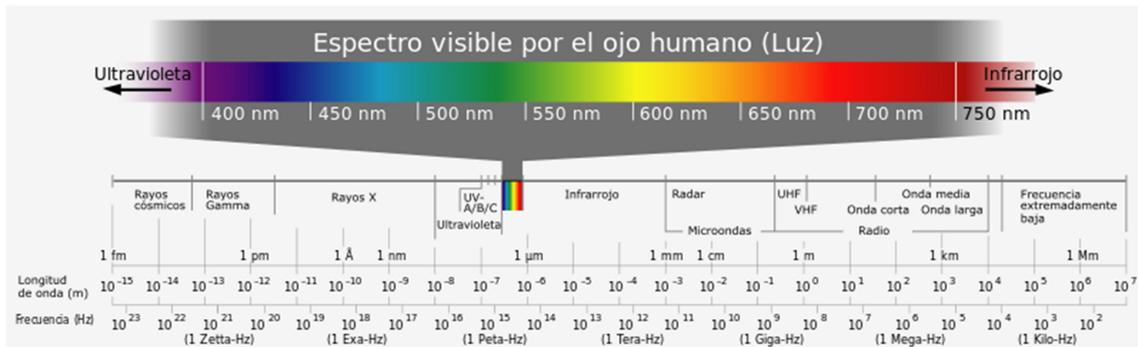


Figura 1. Espectro electromagnético.

El uso de la luz para transmitir información se remonta más allá del desarrollo de la fibra con la invención del fotófono patentado en 1880 por Alexander Graham Bell quien lo describió como su más grande invención, incluso mayor que el teléfono [1]. Este dispositivo modulaba la luz solar con una señal de voz y la transmitía a través del aire hasta un detector de estado sólido (Figura 2) Así nació el primer enlace Óptico y lo hacía sin la necesidad de una fibra.

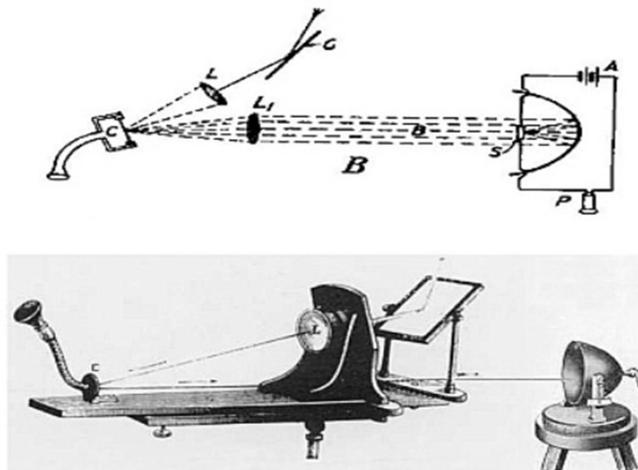


Figura 2. El Fotófono de Bell – Tainter, 1880

Al igual que en el invento de Bell, la tecnología de óptica en el espacio libre (FSO) se propaga en el aire (o mejor dicho la atmósfera terrestre), un medio que dificulta el proceso de propagación y constituye el principal reto de la tecnología. Un sistema de transmisiones ópticas en el espacio libre (*Free Space Optics* o FSO), también llamado acceso inalámbrico óptico, puede definirse como un sistema de comunicación punto a punto que transmite luz a



través del aire (generalmente procedente de un láser en el rango del infrarrojo), en lugar de hacerlo a través de una fibra óptica [2].

A diferencia de los sistemas de radio y microondas, no se requieren licencias de espectro y la interferencia con otros sistemas no es una preocupación. La señal láser es extremadamente difícil de interceptar, por lo que es ideal para las comunicaciones seguras y se consiguen velocidades de datos comparables a las comunicaciones ópticas de fibra a una fracción del costo de despliegue. [3]. En los últimos años la tecnología ha atraído considerablemente la atención para una variedad de aplicaciones. Debido a la complejidad asociada con la modulación de fase o frecuencia, los sistemas de comunicación óptica de espacio libre actuales usan típicamente la modulación de intensidad con detección directa (IM / DD).

El objetivo de este trabajo es ofrecer una panorámica de la tecnología FSO, las diferentes condiciones de la atmósfera que ejercen influencia cuando la señal luminosa pasa a través del espacio libre y un análisis de la factibilidad para ser empleada en Cuba.

## 2. Metodología

Para realizar este trabajo, considerado una primera fase de un estudio más amplio, se empleó el método histórico lógico para poder contextualizar el problema de investigación, sus antecedentes y desarrollo. Por una parte, se estudia el estado del arte de la tecnología FSO y por la otra se investiga el material disponible en materia de lluvias y nieblas en nuestro país por la incidencia que tienen estos fenómenos en la propagación de la luz. Para dar continuidad al tema, en trabajos posteriores se emplearán varios métodos científicos; el hipotético-deductivo, analítico-sintético, la modelación, el estadístico-matemáticos y la simulación para llegar a una metodología práctica de diseños de enlaces de este tipo.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1 Generalidades del funcionamiento de los enlaces FSO.

Los sistemas de Óptica de Espacio Libre (FSO) funcionan siempre y cuando exista una clara línea de visión entre la fuente y el destino (LoS, line-of-sight) y el receptor óptico

pueda decodificar de manera fiable la Información transmitida [3], la longitud de onda de transmisión debe estar dentro de alguna de las ventanas atmosféricas como 850nm o 1550nm. En el trayecto, todo componente influye de manera más o menos significativa, se incluyen obstáculos, moléculas, partículas y la variación de sus propiedades físicas. La figura 3 muestra los factores ambientales a considerar.

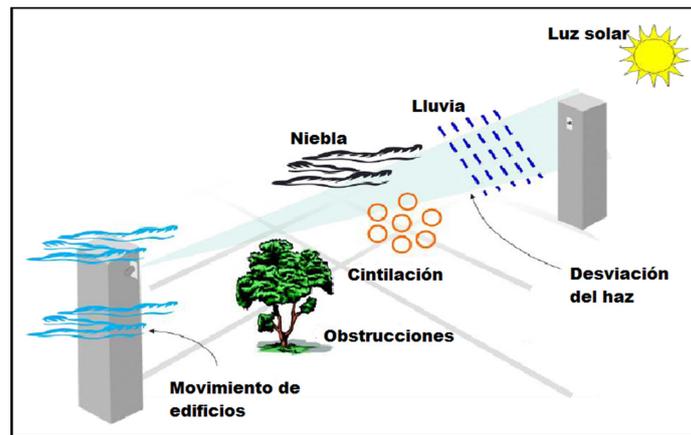


Figura 3 Factores ambientales presentes en un enlace FSO

Son típicas de estos enlaces varias componentes de pérdida geométrica: ancho del haz del transmisor óptico, longitud de la trayectoria ( $L$ ), ángulo de divergencia ( $\theta$ ) y los diámetros de apertura del transmisor y del receptor. Las pérdidas geométricas son calculables ya sea con datos del fabricante o del emplazamiento concreto. En la figura 4 se muestra el efecto que tiene sobre un haz un ángulo de divergencia de 1mrad a la distancia de 1km

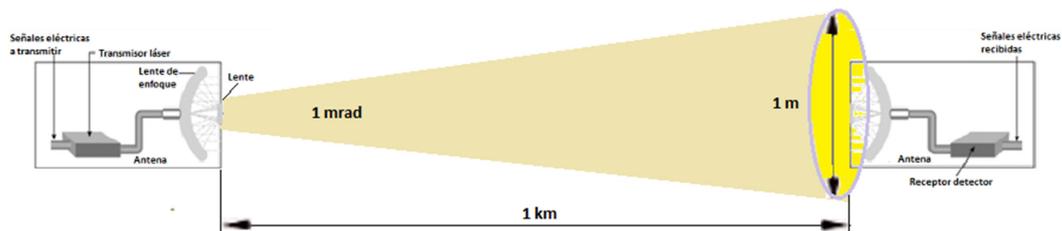


Figura 4. Pérdida geométrica por efecto de la divergencia. Fuente Elaboración propia.

La experiencia en comunicaciones por fibra óptica nos muestra cuatro métodos de modulación más probables: cambio de fase (phase - shift keying PSK), cambio de frecuencia (frequency shift keying FSK), estado de cambio de polarización (state of



polarization shift keying SoPSK) y amplitud o encendido / apagado (amplitude or on - off keying, OOK). El método de modulación OOK es la forma más básica de modulación pulsada y se utiliza en receptores binarios de detección directa en fibra óptica y en comunicaciones FSO, para los cuales el rendimiento del enlace frente a la longitud del enlace, la relación señal / ruido (BER) han sido estudiados a fondo. La robustez del método OOK se basa en que la luz pulsada con detección directa no depende tanto de las variaciones de fase como de polarización, aunque sí de la intensidad.

### 3.1.1 Ecuaciones fundamentales del enlace FSO.

La ecuación de enlace (ecuación 1) para un sistema FSO es muy simple (dejando de lado las eficiencias ópticas, detectores de ruido, etc.), la misma establece que la cantidad de potencia recibida es proporcional a la cantidad de potencia transmitida y el área de apertura. Esto es inversamente proporcional al cuadrado de la multiplicación de la divergencia del haz por el alcance del enlace.

$$P_{rec} = P_{trans} * \frac{A_{rec}}{(Div * Rango)^2} * \exp(-\alpha * Rango) \quad (1)$$

Donde:

- $P_{rec}$  es la potencia recibida
- $P_{trans}$  es la potencia transmitida
- $A_{rec}$  es el área de recepción
- $Rango$  es el alcance o longitud del enlace
- $Div$  es la divergencia del haz
- $\alpha$  es el factor de atenuación atmosférica

La potencia recibida es también inversamente proporcional al producto exponencial del coeficiente de atenuación de la atmósfera (en unidades de 1/distancia) por el alcance del enlace [2]. El factor de atenuación  $\alpha$  es el exponente de la Ley de Beer que domina completamente el comportamiento del sistema FSO en condiciones reales de la atmósfera para obtener el porcentaje de disponibilidad de la portadora [2]. Además de las componentes geométricas, la otra componente controlable es la potencia de transmisión, en cambio el coeficiente de atenuación de la atmósfera es incontrolable [2]. De hecho, las impredecibles variaciones de la atenuación atmosférica causadas por la combinación



aleatoria de diferentes variables climáticas, se manifiestan sobre la forma de variaciones significativas de los niveles de señal en la entrada del receptor llegando a producirse micro-cortes cuando el nivel de potencia óptica que llega es inferior a la sensibilidad del receptor. Conocer previamente la indisponibilidad probable es importante en el diseño de un enlace de comunicaciones ópticas puesto que permite elegir un alcance de comunicación en el cual se espera un determinado tiempo de interrupción que no afecte las prestaciones del sistema [4].

La consideración del balance de potencia supone un parámetro esencial para diseñar los enlaces FSO. El margen del enlace,  $M_{enlace}$  (dB), que representa la potencia disponible por encima de la sensibilidad del receptor, está dado por la ecuación (2) [5]:

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

Siendo:

- $P_e$ (dBm): potencia total del transmisor
- $S_r$ (dBm): sensibilidad del receptor que depende también de la velocidad de transmisión de datos.
- $A_{geo}$ (dB): atenuación geométrica del enlace provocada por la dispersión del haz de transmisión que se produce al aumentar el alcance
- $A_{atmo}$ (dB): atenuación atmosférica debida a la absorción y la dispersión
- $A_{centelleo}$  (dB): atenuación provocada por las turbulencias atmosféricas
- $A_{sistema}$  (dB): representa las demás pérdidas dependientes del sistema, entre otras, problemas de alineamiento de la dirección del haz, las pérdidas ópticas del receptor, las pérdidas por fluctuación lenta del haz, la reducción de la sensibilidad debida a la luz ambiente (radiación solar), etc.

Nótese que en esta ecuación hay dos parámetros no controlables, la atenuación atmosférica y la atenuación por centelleo (que tiene relación con en el comportamiento de la atmósfera).

### 3.2 La atmósfera terrestre.

La atmósfera de nuestro planeta es una mezcla de gases que forman una capa que lo rodea y que es retenida por el campo gravitatorio. Se compone en un 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno, 1% de argón, 0,04% de dióxido de carbono y otros gases en cantidades más pequeñas (He, Ne, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, Kr y otros). Además de estos componentes, se suman un 1% aproximadamente de vapor, aerosoles naturales, artificiales y contaminantes (flúor, cloro,



mercurio y dióxido de azufre) además del polvo, las esporas, el polen y otros. Esta composición depende del sitio específico y varía en el año. Tres cuartas partes de la masa de la atmósfera está a 11 Km de la superficie. La atmósfera se distingue en capas (de menor a mayor), Figura 5 [6]:

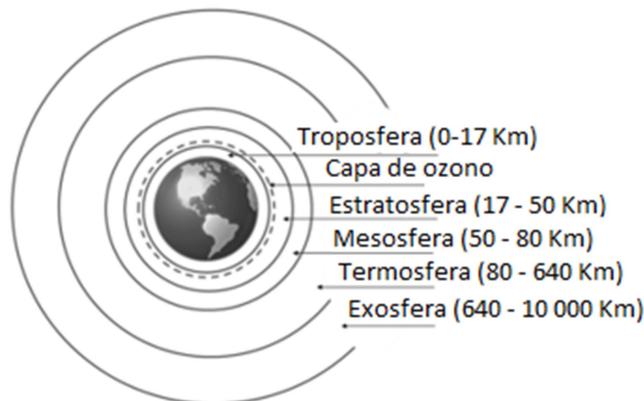


Figura 5. Capas de la atmósfera. Fuente [6]

Obviamente, la capa de interés para las comunicaciones ópticas terrestres (del tipo FSO) es la Tropósfera donde se aprecian fenómenos que afectan la propagación del haz, fundamentalmente los meteorológicos, que interactúan y afectan a la calidad de la señal.

La tropósfera es un medio altamente dinámico e inestable; los gases, vapores, y en general todos sus componentes se mueven continuamente, cambian su consistencia y características con la variación de la luz solar, la temperatura y la presión de manera que es muy difícil crear un modelo que la represente. Pese a su complejidad, la tropósfera debe ser examinada y entendida. La comprensión de los fenómenos troposféricos y la forma en que afectan a la propagación de la luz ayuda a mejorar la eficacia de los enlaces FSO. Una de las tendencias que se han desarrollado es la de crear enlaces eficaces, inteligentes y rentables con la capacidad de autoajustar la potencia de las emisiones láser y la sensibilidad del receptor [6]. Estos mecanismos se adaptan a las condiciones atmosféricas con el objetivo de modificar otros parámetros de la ecuación de enlace cuando la atenuación atmosférica varía y de esta manera poder extender la vida útil del láser y los sensores.

### 3.2.1 Índice de Refracción del Aire



El índice de refracción del aire ha sido un parámetro importante en el estudio de la propagación de la luz a través de él. En 1939, Barrell y Sear formularon el primer modelo matemático del índice de refracción del aire en el espectro visible con determinadas condiciones de temperatura y presión. Posteriormente se formularon otros modelos empíricos ajustando una curva sobre los datos para el índice de refracción de "aire estándar" modificando estos parámetros y tomando en consideración una longitud de onda de vacío y más tarde en el rango del infrarrojo.

### **3.2.2 Electricidad atmosférica.**

Entre nubes y entre las nubes y la superficie terrestre puede generarse una diferencia de potencial típico que oscila entre 20.000 V y 100 MV, lo que puede causar múltiples descargas de rayos a través de la atmósfera, cada una con hasta 35.000 A. Estas descargas emiten destellos de ondas electromagnéticas de longitudes que van desde las RF hasta los rayos gamma. Si bien la duración de las emisiones pueden estar tan solo entre 20 y 130ms, en comunicaciones FSO puede significar pérdida de datos sustanciales; por ejemplo, a 1 Gb/s 100ms equivalen a  $10^8$  bits (o 12,5 Mbytes).

### **3.2.3 Marea atmosférica.**

El vapor y el ozono absorben la radiación periódica del Sol causando mareas atmosféricas en la tropósfera y en la estratósfera. Las mareas atmosféricas se propagan en una atmósfera donde la densidad varía significativamente con la altitud causando viento, temperatura, densidad y fluctuaciones de presión con una oscilación periódica de aproximadamente 24 horas. Cerca del nivel del suelo, las mareas atmosféricas se manifiestan con mínimos de presión a las 4 am y 4 pm y máximos de presión a las 10 am y a las 10 pm [6].

## **3.3 Efectos de la atmósfera sobre los enlaces ópticos en el aire FSO.**

La atenuación atmosférica es el efecto más significativo y puede conducir a pérdida de señal y fallo de enlace, pero la atmósfera no sólo atenúa la onda de luz, sino que también la distorsiona y desvía. La potencia transmitida de la señal emitida está muy afectada por los fenómenos de dispersión y turbulencia. También hay que considerar otros factores que pueden causar la interferencia en parte por fenómenos que ocurren en la atmósfera y por el efecto del sol.

### **3.3.1 Atenuación**



La atenuación es principalmente el resultado de la absorción y dispersión por moléculas y partículas (aerosoles) suspendidas en la atmósfera [3].

### 3.3.1.1 Absorción.

El coeficiente de absorción para una longitud de onda dada depende del tipo de molécula de gas y de su concentración. Cada componente del aire es responsable de la atenuación de la luz, aunque la magnitud real depende del tipo de molécula, el tamaño, su densidad y la longitud de onda. En general, cuanto más grande es la longitud de onda, menor es la atenuación, y comienza a convertirse en un problema por encima de 5 GHz. El comportamiento del enlace es una manifestación de la ley de Beer-Lambert. Esta ley establece la transmisividad de la materia transparente como la relación  $T = \frac{I}{I_0}$ , donde  $I$  e  $I_0$  son la intensidad o potencia después de cruzar la materia y la potencia incidente, respectivamente [6]. La transmisividad depende logarítmicamente del producto del coeficiente de absorción  $\alpha$  y del recorrido  $L$  de la luz. El coeficiente de absorción en el caso de los gases es el producto de la sección transversal de absorción  $\sigma$  y la densidad  $N$  de los elementos que absorben (ecuación 3):

$$T = e^{-\sigma NL} \quad (3)$$

Por su parte la Absorbancia (lo contrario de la transmisividad) se expresa como (4):

$$A = \sigma NL \quad (4)$$

Se aprecia que es lineal con la densidad de los elementos que absorben. Debido a que la atmósfera está formada por diferentes gases, cada uno con diferentes valores de absorbancia, la ley de Beer para la absorción atmosférica global se pudiera expresar como nos muestra la ecuación 5:

$$I = I_0 \exp(-m(\tau_a + \tau_g + \tau_{NO_2} + \tau_w + \tau_{O_3} + \tau_r)) \quad (5)$$

Donde los valores de  $\tau$  se corresponden con diferentes componentes de profundidad óptica que absorben y dispersan la luz:

$\tau_a$ : aerosoles,  $\tau_g$ : gases uniformemente mezclados (principalmente dióxido de carbono  $CO_2$  y oxígeno molecular  $O_2$ ,  $\tau_{NO_2}$ : dióxido de nitrógeno debido a contaminantes atmosféricos,  $\tau_w$ : agua,  $\tau_{O_3}$ : del ozono,  $\tau_r$ : dispersión de Rayleigh.  $m$  es el factor de masa



óptica (también llamado factor de masa de aire), que se aproxima a  $\frac{1}{\cos \theta}$ , donde  $\theta$  es el ángulo entre la perpendicular a la superficie de la Tierra y el objeto observado (el ángulo cenital) [6]. La ecuación anterior, que ya parte de suposiciones para simplificar el problema, muestra que la atenuación atmosférica es extremadamente difícil de describir matemáticamente. Aun así, se ha modelado de manera experimental o empírica y en general estos modelos son aplicables a ubicaciones y aplicaciones específicas. Entre estos modelos, el de Longley - Rice predice pérdidas de transmisión para la comunicación troposférica y mapas de datos sobre terreno irregular y ha sido adoptado como estándar por la FCC. Sin embargo, esta norma se refiere a señales entre 20 MHz y 40 GHz y para longitudes de trayectoria de 1 Km a 2000 Km [6]. El régimen óptico es un tema que se estudia actualmente y un modelo confiable y eficiente aún no existe [6]. Uno de los modelos más empleados es el de Kruse, que proporciona una fórmula semi-empírica que relaciona la visibilidad meteorológica con la atenuación atmosférica óptica, desde el rango visible hasta cerca de IR para polvo, aerosol y niebla (si las partículas de niebla son mucho más pequeñas que la longitud de onda):

$$\Gamma(V, \lambda) = \left(\frac{17}{V}\right) \cdot \left(\frac{550}{\lambda}\right) \cdot 0,581 \cdot V^{\frac{1}{3}} \quad (\text{dB/Km}) \quad (6)$$

Donde  $V$  es el rango visible en Km y  $\lambda$  la longitud de onda.

La visibilidad es un término específicamente definido para la meteorología, la aviación y el tráfico en general. Caracteriza el grado de transparencia de la atmósfera en el espectro visible, se mide por el alcance visual de la pista (runway visual range RVR) y es la distancia hasta la cual un haz luminoso paralelo viaja a través de la atmósfera y su intensidad (o flujo luminoso) se reduce al 5% de su valor original [6].

### **Niebla.**

Según la Organización Meteorológica Mundial las nieblas se definen como la suspensión en el aire de gotas muy pequeñas de agua, habitualmente microscópicas, que generalmente reducen la visibilidad horizontal en la superficie de la Tierra. El coeficiente de atenuación (expresado en dB / Km) no es el mismo para todas las ondas electromagnéticas, sino una función de la longitud de onda. Las comunicaciones con frecuencias más bajas son



atenuadas menos por la niebla como es el caso de las frecuencias de radio, pero las frecuencias "ópticas", son atenuadas por la niebla de manera considerable.

### ***Esmog***

El esmog es una combinación de humo, niebla y diversas partículas que se encuentra en la atmósfera de los lugares con elevados índices de contaminación. El fenómeno se produce cuando el aire se estanca por un periodo extendido de alta presión y las partículas contaminantes quedan flotando en las capas atmosféricas inferiores por su mayor densidad. Es en esencia dióxido de azufre resultante de la quema de carbón. Por otra parte, las emisiones vehiculares e industriales interactúan con la humedad y otras moléculas en la atmósfera cuando la luz solar incide y se forman contaminantes químicos secundarios conocidos como esmog fotoquímico que absorbe y dispersa la luz láser en las comunicaciones FSO.

### ***Lluvia***

Desde el punto de vista meteorológico los sistemas productores de precipitación están gobernados principalmente por los movimientos verticales del aire. En su ascenso, al encontrar un ambiente más frío, el vapor de agua contenido en el aire se condensa y ocurre la formación de gotas de nube. Estas gotas crecen por diferentes mecanismos y caen dando lugar a la lluvia [8]. Las gotas de agua de lluvia se encuentran en el rango de 100 $\mu$ m a 10mm y el tamaño determina la atenuación, pero también la densidad y la velocidad de caída. La unidad de velocidad de lluvia, también conocida intensidad es el mm/h. Es un parámetro muy utilizado en diversas aplicaciones ingenieras, relacionadas fundamentalmente con la seguridad de obras civiles y arquitectónicas, la proyección de sistemas de conducción de caudales máximos así como la protección y conservación de los suelos [8]. El sector de normalizaciones de la UIT ha propuesto mapas de las zonas hidrometeorológicas para la predicción de los efectos de la precipitación en los que Cuba se sitúa en zona N, véase la figura 6.

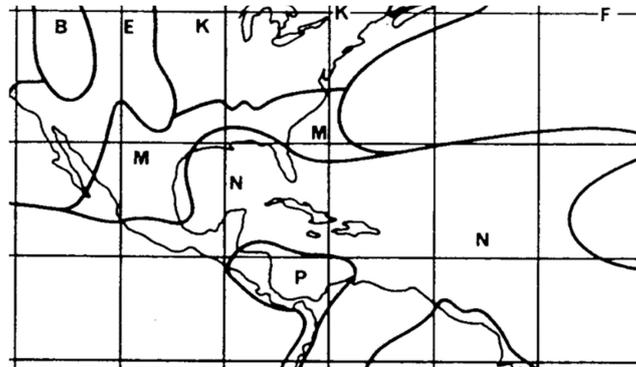


Figura 6. Mapa de zonas hidrometeorológicas fuente [9]

Para el presente trabajo se utilizan datos hidrológicos de estudios locales.

Por su parte el granizo está compuesto de gotas de lluvia congeladas que, como ella, también afectan la integridad de las señales de comunicación. Sin embargo, el granizo tiene un tamaño entre 5mm y 50mm. Se han desarrollado modelos empíricos de atenuación de la lluvia para predecir la atenuación de la señal óptica desde el rango de visibilidad (ecuación 7).

$$a_{Rain} = \frac{2.9}{V} \quad (7)$$

Existe otra forma de precipitación que es la nieve que no se tratará en el presente trabajo porque nuestro país se encuentra en una zona tropical.

Hay autores que proponen el uso de la visibilidad con independencia del origen atmosférico de la misma para estimar la atenuación en dB / Km como la Tabla 1 que se muestra a continuación y que nos da una idea del impacto de estos fenómenos.



Código internacional de visibilidad				
Condiciones meteorológicas	Precipitación		Visibilidad (m)	Atenuación (dB/km)
	mm/h			
Niebla densa			0	
Niebla espesa			50	315
Niebla moderada			200	75
Niebla ligera			500	28,9
Niebla muy ligera	Tormenta	100	770	18,3
			1 000	13,8
Nebolina ligera	Lluvia intensa	25	1 900	6,9
			2 000	6,6
Nebolina muy ligera	Lluvia media	12,5	2 800	4,6
			4 000	3,1
Tiempo despejado	Lluvia ligera	2,5	5 900	2
			10 000	1,1
Tiempo muy despejado	Llovizna	0,25	18 100	0,6
			20 000	0,54
			23 000	0,47
			50 000	0,19

Tabla 1. Valores de Visibilidad y atenuación. Fuente UIT-T, 2007

### 3.3.1.2 Dispersión.

A medida que la luz pasa a través de la atmósfera, los fotones interactúan con moléculas y otras partículas y se dispersan en todas las direcciones posibles como bolas de billar; es decir, los fotones son desviados por las moléculas sin alterar su longitud de onda o energía. Sin embargo, todos los fotones no interactúan de la misma manera, porque el mecanismo de dispersión real depende del tamaño y tipo de moléculas y de la longitud de onda de la luz.

Basándose en el tamaño de partícula y la longitud de onda de la luz, se identifican tres mecanismos de dispersión:

Dispersión de Rayleigh: cuando  $r \ll \lambda$

Dispersión de Mie: cuando  $r \sim \lambda$

Dispersión geométrica: cuando  $r \gg \lambda$

Claramente, en la atmósfera, donde muchos tipos y tamaños de partículas y moléculas diferentes están presentes, la dispersión se puede producir por uno o varios de los mecanismos anteriores [6].



### ***Dispersión de Rayleigh***

Ocurre cuando las partículas en la atmósfera son mucho más pequeñas que la longitud de onda de la luz que pasa a través de ellas. Como consecuencia, la dispersión de Rayleigh a 400nm es aproximadamente 10 veces mayor que a 700nm para una intensidad de luz igual [6]. Produce patrones de transmisión hacia delante y hacia atrás como lóbulos de antena, que son más estrechos y más intensos para partículas más pequeñas ver figura 7 [6].

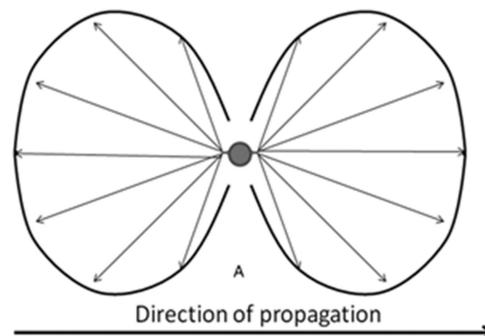


Figura 7. Patrones de transmisión dispersión de Rayleigh. Fuente [6]

Su efecto no es considerable para las transmisiones FSO.

### ***Dispersión de Mie.***

La dispersión de Mie, resultado de la teoría de la dispersión de ondas planas electromagnéticas por una esfera dieléctrica, se produce cuando el radio de las partículas en la atmósfera, incluidos los aerosoles, es aproximadamente del mismo tamaño que la longitud de onda de la luz que pasa a través de ella. El polvo, el polen, el humo y el vapor de agua son responsables de la dispersión de Mie. Como consecuencia, la dispersión de Mie ocurre en la capa inferior de la tropósfera donde dichas partículas están en mayor concentración, particularmente durante condiciones de nublado [6].

La dispersión de Mie no depende mucho de la longitud de onda y produce un patrón de transmisión hacia delante como un lóbulo de antena, que es más estrecho y más intenso para partículas más grandes, figura 8 [6].

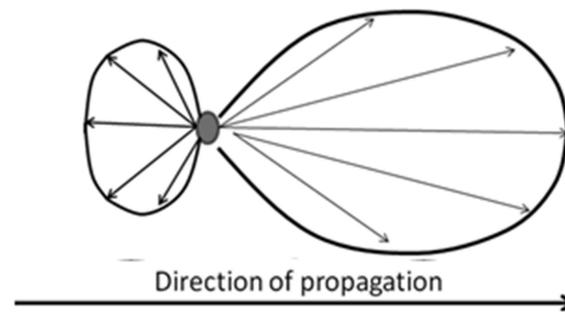


Figura 8. Patrones de transmisión dispersión de Mie. Fuente [6]

Su efecto en transmisiones FSO si es importante a ser considerado.

### ***Dispersión geométrica***

Esto ocurre cuando las partículas en la atmósfera son órdenes de magnitud más grandes que la longitud de onda; en aplicaciones FSO donde la luz láser es de  $1,5\mu\text{m}$ , si el tamaño de partícula es del orden de mm se puede presentar la dispersión geométrica. Tales partículas pueden ser tierra, arena y polvo que se mezclan en el aire durante tormentas y vientos fuertes en partes específicas (desiertos, áreas agrícolas, por la actividad volcánica, etc.). En este caso, la dispersión y la atenuación de la luz dependen de la densidad de partículas por centímetro o metro cúbico, y es mucho más pronunciada que la dispersión de Rayleigh o Mie.

### **3.3.2 Distorsión**

La distorsión es causada por la turbulencia atmosférica que hace fluctuar el índice de refracción. Si bien la atenuación afecta el valor medio de la señal recibida en un enlace óptico la distorsión da como resultado una variación de la señal alrededor de la media.

### ***Turbulencia.***

Las partículas y moléculas que forman la atmósfera constantemente ganan o pierden energía (calor). Algunas zonas se calientan o enfrían más que otras. Hay expansión y contracción en zonas (células) del aire, movimiento ascendente y descendente, así como desplazamientos laterales. El resultado final es el fenómeno de turbulencia térmica en estas células de aire caracterizadas por un índice de refracción no homogéneo y cambiante que alteran a su vez la densidad y consistencia del aire [6]. Estas variaciones se denominan remolinos y tienen un efecto de lente sobre la luz que pasa a través de ellos. Si el tamaño de



los remolinos de turbulencia es mayor que el diámetro del haz, todo el haz láser se dobla, como se muestra en la Figura 9.

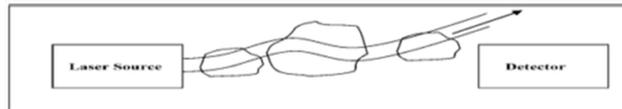


Figura 9 Desviación del haz debido a células de turbulencia mayores que su diámetro. Fuente [3].

La polarización, refracción, absorción, dispersión y atenuación del haz fluctúan aleatoriamente a una frecuencia entre 0,01Hz y 200Hz; bajo las mismas condiciones, la intensidad y frecuencia de las fluctuaciones aumentan con la frecuencia de la onda [6].

### ***Centelleo.***

Es la fluctuación de señal debido a la turbulencia térmica cuando los remolinos de turbulencia son más pequeños que el diámetro del haz [6], ver figura 10. La magnitud del efecto de centelleo se define como la relación entre su amplitud instantánea y su valor medio en la unidad de tiempo, expresada en unidades de decibeles. El fenómeno, además de complejo, tiene una alta dependencia de los fenómenos atmosféricos por lo tanto, los modelos teóricos de centelleo son valiosos siempre y cuando los parámetros y condiciones de los límites que se desarrollaron se mantengan, y también requieren la validación de datos experimentales [6]. En los enlaces de comunicación FSO, el conocimiento del índice de centelleo es importante para determinar el rendimiento del sistema. El índice de centelleo aumenta con la longitud de la trayectoria, mientras que la señal óptica se vuelve menos coherente y el efecto de enfoque en el receptor de potencia óptica se deteriora [6].

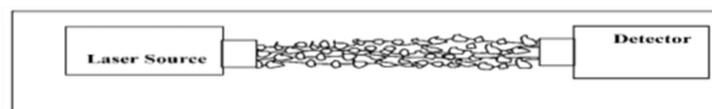


Figura 10. Centelleo debido a células de turbulencia de menor diámetro que el haz [3].

Para mejorar el efecto de centelleo, el diámetro de la lente colectora en el receptor se incrementa [6].

### **3.3.3 Interferencia.**



La fotosfera del Sol emite ondas electromagnéticas de alta intensidad que son capaces de interferir con la transmisión electromagnética incluyendo las frecuencias ópticas. Sin embargo, la interferencia solar ocurre si el canal de comunicaciones opera en la zona del espectro que va desde aproximadamente  $0,2\mu\text{m}$  y se extiende más allá de  $2\text{nm}$ , con la mayor intensidad en el rango visible alrededor de  $500\text{nm}$  (el espectro visible es de  $400$  a  $700\text{nm}$ ) [6]. En sistemas de comunicación FSO, las longitudes de onda más populares son cerca de los  $800\text{nm}$  y de los  $1550\text{nm}$ . Por lo tanto, hay interferencia solar potencial, aunque la interferencia es más probable que sea a  $800\text{nm}$  que a  $1550\text{nm}$ . Sin embargo, para que la interferencia solar sea problemática, la luz solar debe caer sobre el foto-detector. Además, cuando se utiliza  $1550\text{nm}$ , un filtro óptico de paso-alto en el receptor puede rechazar longitudes de onda por debajo de los  $1300\text{nm}$  para reducir en gran medida la interferencia de la radiación de fondo solar (SBR). En FSO, la radiación de fondo solar (SBR) se puede reducir considerablemente con el diseño adecuado de la carcasa y con filtros ópticos [6]. La ubicación de los transceptores es igualmente vital. Es importante mencionar que la atmósfera también emite ondas electromagnéticas. La emisión atmosférica es lo opuesto a la absorción y ocurre cuando la luz entra en este medio provocando que los átomos y las moléculas se exciten y ganen energía. Los átomos excitados pueden emitir energía térmica o fotónica que puede estar dentro del rango de la radiación infrarroja lo cual puede causar interferencias.

#### **3.3.4 Desalineación.**

El viento es el movimiento de las masas de aire que tiene lugar en la troposfera y en la estratosfera. La luz misma no es afectada por el viento solamente, pero sí lo es por lo que causa (variación de la temperatura y otros factores). Sin embargo, en aplicaciones FSO, el viento tiene un efecto degradante en la alineación del haz porque los transceptores FSO están situados en edificios altos o en postes. Un fuerte viento puede desplazar un edificio alto por unos pocos metros y así desplazar el haz de su receptor objetivo. Como consecuencia, el efecto de los vientos en la alineación del haz puede ser significativo. En resumen, el efecto del desplazamiento del haz depende de si el haz es colimado, es divergente o está enfocado, en el diámetro del haz, y también si los transceptores tienen un



sistema de seguimiento automático para mantener la alineación incluso si la posición de un transceptor cambia unos pocos metros con respecto al otro [6].

### 3.4. Factibilidad del uso de la tecnología FSO en Cuba.

Siendo las precipitaciones y las nieblas los factores atmosféricos que más incidencia tienen en los enlaces FSO, a continuación, se ofrece una caracterización del comportamiento de estos fenómenos en nuestro país.

#### 3.4.1 Comportamiento de las precipitaciones en Cuba.

En nuestro país no se registra la intensidad de lluvias de manera sistemática, pero sí los acumulados con una red de pluviómetros que cubre todo el territorio nacional. No obstante, se han realizado estudios como el presentado en 2004 donde se hace un análisis de la distribución de precipitaciones cuya intensidad es igual o superior a 50 mm en 24 horas. La población de estas lluvias es genéticamente heterogénea. De manera general, las lluvias se agrupan en continuas y en forma de aguaceros y, según sea el evento que las produce, posee características diferentes en cuanto a la intensidad, duración y magnitud de la lámina total de lluvia acumulada. En el caso de las lluvias de corta duración, iguales o menores de una hora, las características físico geográficas locales influyen sensiblemente en el comportamiento espacial y temporal de este fenómeno; por ello, una determinada situación sinóptica puede provocar lluvias intensas en una estación debido a factores locales, no ocurriendo así en los territorios aledaños. Así mismo, pueden desarrollarse condiciones meteorológicas de mesoescala que afectan sólo a una región, como la "aeroavalancha" del 30 de mayo de 1955 en la Universidad Central, descrita por Lecha, Paz y Lapinel (1994), donde se registraron 51 mm en solo 30 min., con una intensidad media de 1.7 mm/min [8]. Al analizar las frecuencias anuales de las precipitaciones mayores o iguales que 50 mm en 24 horas en nuestro país se observa que, en general, son más significativas en la región occidental, disminuyendo hacia el Este. En un estudio presentado en 2004 se observó que la máxima frecuencia que se registró fue de 1.9%. En la figura 11 se observa un mapa con la distribución de la frecuencia anual de ocurrencia de lluvias intensas.

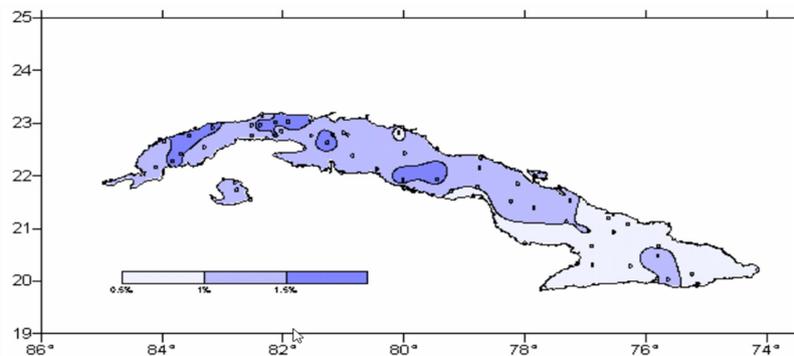


Figura 11. Frecuencia anual de ocurrencia de lluvias iguales o mayores a 50 mm-24h. Fuente [8]  
De manera general, se ha determinado la notable influencia que ejercen los grandes eventos pluviales sobre la distribución de la lámina máxima de lluvia en Cuba. En este sentido, se determinó que existe una estrecha relación entre la distribución de los valores máximos de lluvia, el relieve y la trayectoria de los sistemas meteorológicos que producen grandes precipitaciones, principalmente los ciclones tropicales. [8].

### 3.4.2 Comportamiento de las nieblas y neblinas en Cuba.

Usando como base los estudios realizados por el Instituto de Meteorología en las estaciones meteorológicas se ha determinado que las nieblas constituyen un fenómeno local y multicausal. Desde el punto de vista climático se ha determinado un contraste con zonas de máxima y mínima ocurrencia según la lógica que imponen el relieve, la distancia a la costa y el uso de suelo, pero eso puede no ser suficiente para estudios más locales donde tal vez se precise de mediciones in situ. En general puede decirse que tanto nieblas como neblinas tienen distribuciones parecidas con bajos valores de ocurrencia cerca de las costas y altos fundamentalmente en regiones montañosas como se muestra en la figura 12.

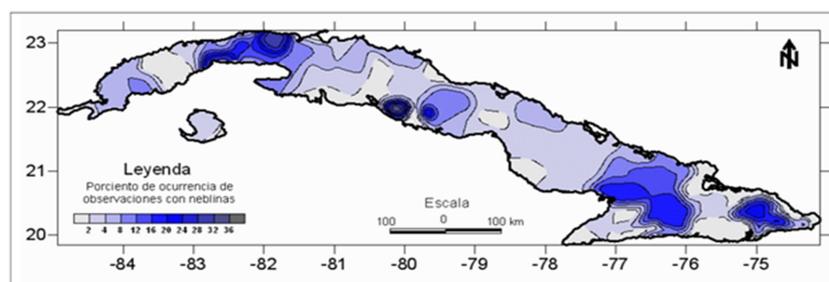


Figura 12. Distribución espacial porcentaje de ocurrencia de neblinas. Fuente [8]



Tanto nieblas como neblinas tienen un porcentaje de ocurrencia mayor alrededor de las 7 de las 07:00 hora del meridiano  $75^{\circ}W$  y la duración puede ir desde 30 minutos hasta 90 minutos. La neblina como promedio para todo el país es un fenómeno 5 veces más frecuente que las nieblas.

#### 4. Conclusiones

Como se ha podido apreciar, los sistemas de transmisión óptica en el espacio libre (FSO) se han desarrollado al punto de compararse en algunos parámetros con las prestaciones de fibra óptica. El desarrollo de estos sistemas sigue su curso buscando mecanismos para mejorar su desempeño venciendo el gran obstáculo que constituye la atmósfera. Se han desarrollado métodos para modelar el comportamiento de los factores atmosféricos siendo la lluvia y la niebla los que más atención han tenido y existe la tendencia a utilizar la visibilidad para simplificar la estimación de las pérdidas por este concepto. En Cuba es factible emplear esta tecnología puesto que la manifestación de niebla es muy baja en comparación con la neblina, condición bajo la cual se mantienen funcionando los enlaces. Tanto niebla como neblina están distribuidas de manera que las grandes ciudades no son de las áreas más afectadas. Con las conclusiones a las que se arriba se puede recomendar el uso de esta tecnología en nuestro país. Además se recomienda que se dé continuidad a esta investigación y se proponen dos vertientes de estudio, las condiciones atmosféricas de una forma más precisa y enfocada a esta aplicación y el comportamiento que tienen los sistemas de muy alta frecuencias en nuestro país en nuestras condiciones atmosféricas puesto que de estos sistemas se tienen mediciones de atenuación, disponibilidad y BER.



## 5. Referencias bibliográficas

- [1] E. Korevaar, I. I, and K. a. B. McArthur, "Atmospheric Propagation Characteristics of Highest Importance to Commercial Free Space Optics," MRV Communications.
- [2] I. R. Ayala, D. R. Ayala, F. Z. Arteaga, and M. N. Toro, "Estudio de Nuevas Tecnologías. Análisis para el Fortalecimiento del Marco Regulatorio del Sector de Telecomunicaciones. INFORME FINAL," ed: R&M International Consulting Group Ltd. Engineering, Regulation & Business, 2004.
- [3] M. K. R. Patel and M. S. K. Mulye, "Free Space Optics (FSO)-Past, Present, Future and Mathematical Models of Atmospheric Turbulence for FSO Link Budget Analysis," International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication IJRITCC vol. 4, 2016.
- [4] A. O. Pantoja and L. S. F. Valdivia, "Title," unpublished|.
- [5] UIT-T, "RECOMENDACIÓN UIT-R P.1814. Métodos de predicción necesarios para diseñar enlaces ópticos terrenales en espacio libre," in Cuestión UIT-R 228/3, ed, 2007.
- [6] S. V. Kartalopoulos, Free Space Optical Networks for Ultra-Broad Band Services 2011
- [7] L. Á. Escudero, I. B. Montejó, and R. Á. Morales, "Distribución espacial de las nieblas en Cuba," ed. La Habana: Instituto de Meteorología, CITMA, 2008.
- [8] E. P. Gutiérrez, M. L. Martínez, and R. V. González, "PRECIPITACIONES IGUALES O SUPERIORES A 50MM EN 24 HORAS Y MAPA DE PELIGRO POR LLUVIAS INTENSAS," Instituto de Meteorología, La Habana 2004.
- [9] Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT, "Rec. UIT-R PN.837-1 CARACTERÍSTICAS DE LA PRECIPITACIÓN PARA ESTABLECER MODELOS DE PROPAGACIÓN. (Cuestión UIT-R 201/3)," ed, 1994.