

Universidad de Morelos  
Facultad de Ingeniería y Tecnología

Estudio de los Efectos Atmosféricos en  
Comunicaciones Ópticas a  
Espacio Abierto

Tesis

Presentada en cumplimiento parcial  
de los requisitos para el grado de  
Ingeniería en Electrónica y Tel.

Por

Enoc Gallegos Bouchot

Abril 2015

Estudio de los Efectos Atmosféricos en  
Comunicaciones Ópticas en  
Espacio Abierto

Tesis

Presentada en cumplimiento parcial  
de los requisitos para el grado de  
Ingeniería en Electrónica y Tel.

Por

Enoc Gallegos Bouchot

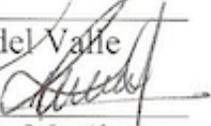
APROBADA POR LA COMISIÓN

  
Asesor Principal: Ing. Gerardo Romo

  
Miembro: Ing. Alejandro Garrido

  
Miembro: Ing. Ignacio Cruz

  
Coordinador: Jair Arody del Valle

  
Director: Alejandro García Mendoza

20- abril - 2015  
Fecha de aprobación

## DECLARACIÓN DE INTEGRACIÓN DE LA FE

Sin duda hoy en día la tecnología ha ido incrementado en gran manera y también se ha realizado grandes investigaciones, y cada vez se encuentran más cosas que algunos pueden interpretar que estamos solos en un mundo abandonado por Dios. Pero al leer más e investigar solo puedo ver la mano de Dios en todo el universo. En mi investigación en algunos artículos leí a que se debe que nosotros podamos ver el cielo azul y ver las nubes, uno de ellos es el esparcimiento de Rayleigh, quien explica como la luz del sol es esparcida y también parte de la energía es absorbida por pequeñas moléculas que hay en el espacio y aire y están hacen que la luz se expanda a todos lados dando así el cielo azul que tanto conocemos.

Todo fue diseñado de tal forma que la luz del sol no nos calentara de más y también que no nos llegara, sino que fue perfectamente para hacer de este mundo un mundo con vida. Ya que el señor todo lo puede, y nosotros no somos capaces de entender.

*Yo conozco que todo lo puedes, Y que no hay pensamiento que se esconda de ti. ¿Quién es el que oscurece el consejo sin entendimiento? Por tanto, yo hablaba lo que no entendía; Cosas demasiado maravillosas para mí, que yo no comprendía. Oye, te ruego, y hablaré; Te preguntaré, y tú me enseñarás. De oídas te había oído; Mas ahora mis ojos te ven. Job 42: 2-5*

## TABLA DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE INTEGRACIÓN DE LA FE .....	iii
TABLA DE CONTENIDO .....	iv
I. ANTECEDENTES.....	1
A.Comunicación a espacio abierto.....	1
B.Polarizacion .....	3
C.Esparcimiento .....	3
D.Ley de Beer y la absorción.....	5
E.Fenómenos atmosféricos .....	6
F.Problema .....	7
G.Objetivos .....	8
H.Pregunta e hipótesis.....	8
I. Limitaciones y delimitaciones .....	8
J. Definición de términos .....	8
II. APORTES AL PROYECTO.....	8
A.Diseño de las bases del sistema de comunicación.....	8
B.Sistema de comunicación laser.....	9
C.Método de esparcimiento .....	9
D.Método de polarización.....	10
E.Resultados.....	10
III.CONCLUSIONES.....	11
A.Conclusiones de la investigación .....	11
B.Reflexión .....	11
C.Recomendaciones .....	11
D.Futuros Aportes .....	11
REFERENCIAS .....	12

# Estudio de los Efectos Atmosféricos en Comunicaciones Ópticas en Espacio Abierto

## Esparcimiento y Polarización

Enoc Gallegos Bouchot,

Facultad de Ingeniería y Tecnología, Universidad  
de Montemorelos

Montemorelos, Nuevo León, México

enoc.gallegos@gmail.com

Ing. Gerardo S. Romo Cárdenas

Facultad de Ingeniería y Tecnología, Universidad  
de Montemorelos

Montemorelos, Nuevo León, México

gromo@um.edu.mx

**Resumen**— Las comunicaciones ópticas en espacio abierto, se refieren a la transmisión de un haz laser modulado a través de la atmósfera para establecer comunicación de información. Este trabajo propone un estudio preliminar de estos sistemas. Es una técnica de reciente exploración, para cuál no se han estado investigando, sus capacidades y limitantes en diversos escenarios y aplicaciones específicas [1, 2].

Teniendo como equipo un kit educativo que funciona haciendo modulación de ancho de pulso para montar una señal de audio a un diodo laser. Se diseñarán experimentos simulando los efectos ópticos de la transmisión en la atmósfera terrestre por medio de una base de grenetina.

Así mismo, se propone hacer experimentos de absorción y polarización del haz para entender mejor su funcionamiento, limitantes y ventajas de estos sistemas de comunicaciones. Según la ley de Beer-Lambert, el haz puede ser absorbido en el trayecto que siga en la atmósfera teniendo diversos efectos en la propagación del haz y la información que se transporta. Así mismo la polarización genera efectos en la intensidad de la señal transmitida.

**Palabras claves:** *Polarización, Esparcimiento, Comunicación óptica de espacio libre, Fenómenos atmosféricos, Polarizadores.*

### I. ANTECEDENTES

#### A. Comunicación a espacio abierto

El concepto de transmisión de información a través del aire por medio de una señal de luz modulada es bastante antiguo; y aunque los avances significativos se han hecho en los últimos 10 años, el concepto sigue siendo relativamente simple: un haz estrecho de luz se puso en marcha en una estación de transmisión, transmitida a través de la atmósfera, y, posteriormente, se recibió en la estación de recepción. Los avances que han dado lugar a lo que ahora se refieren como las comunicaciones ópticas en el espacio libre, o FSO, han surgido en respuesta a una necesidad de mayor ancho de banda de los sistemas de comunicaciones mejoradas. En la medida en FSO y sistemas de transmisión de fibra óptica utilizan infrarrojos (IR) a longitudes de onda similares de luz y además tienen capacidades de ancho de banda de transmisión similares, FSO se refiere a menudo como "óptica sin fibras" o transmisión "inalámbrico óptico" [3].

Sistemas de Comunicación óptica a espacio abierto (FSO) (en el espacio y en el interior la atmósfera) se han desarrollado en respuesta a la creciente necesidad de los sistemas de comunicación a prueba de tomas de alta velocidad. Por otra parte, los enlaces relacionados con satélites, sondas de espacio profundo, estaciones terrestres, vehículos aéreos no tripulados (UAV), plataformas de gran altitud (HAPs), aeronaves y otros interlocutores nómadas

son de interés práctico. Todos los enlaces se pueden utilizar tanto en el contexto militar y civil. FSO es la próxima frontera para la conectividad de red centralizada, como las cuestiones de ancho de banda, de espectro y de seguridad a favor de su adopción como un complemento de la radiofrecuencia (RF) de comunicaciones [4, 5].

Comunicaciones ópticas de espacio libre es una tecnología emergente que ofrece una gran capacidad de uso (datos, voz y video) en una serie para aplicaciones de corto a medio alcance. Los enlaces FSO podrían ser desplegados como la comunicación primaria, de respaldo y de recuperación de desastres que ofrecen una gama de velocidad de 10 Mbits /s-10 Gbit/s [6]. En comparación con la frecuencia de radio convencional (RF) inalámbrica y tecnologías cableadas la línea de visión de los enlaces FSO ofrecen numerosas ventajas: (i) un amplio espectro de frecuencias sin licencia capaz de transmitir datos en exceso de cientos de Gbit / s usando el esquema de multiplexación por división de longitud de onda; (ii) un consumo de energía relativamente inferior; y (iii) la seguridad y la inmunidad a la interferencia electromagnética [7], [8]. Sin embargo, los enlaces FSO al aire libre experimentan pérdidas de señal óptica sustanciales debido a las condiciones climáticas adversas, que degradan gravemente el rendimiento del enlace.

Sin embargo, los enlaces FSO al aire libre experimentan pérdidas de señal óptica sustanciales debido a las condiciones climáticas adversas, que degradan gravemente el rendimiento del enlace. La pérdida es debido principalmente a la absorción atmosférica, la dispersión y la temperatura de centelleos dependientes [9, 10].

#### FOE Desafíos y Beneficios

Para tener una comprensión completa del mercado de FSO, es importante entender los retos y beneficios de la tecnología FSO[12].

Retos FOE primarios son las siguientes:

- La percepción de la gente de ella como una aplicación de mala calidad.

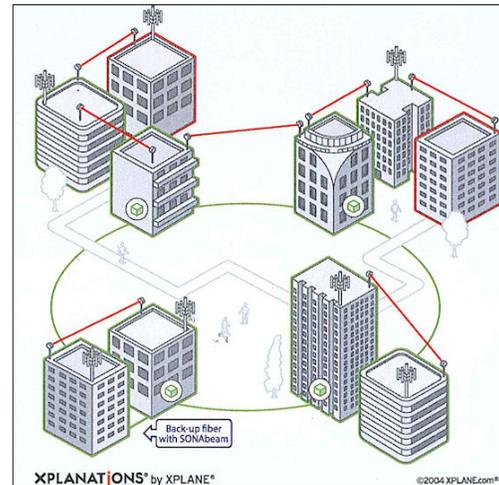


Figura 1. Ejemplo de Comunicación Óptica a Espacio Abierto [11].

- Carencia de la población sobre la conciencia de FOE.
- Existencia de alternativas en competencia, como las líneas de cobre y fibra, así como de RF fijo inalámbrico.
- Condiciones atmosféricas, como la niebla y la lluvia.
- Línea de limitaciones a la vista.
- Limitaciones de distancia.
- Fiabilidad de FSO frente a alternativas de la competencia.
- El proceso de adopción lenta.

Por otro lado, FSO ofrece algunas ventajas:

- Rentabilidad
- Rápida de implementar y volver a implementar
- Ambientalmente seguro, teniendo en cuenta el equilibrio de los ecosistemas, la tecnología, las empresas y las comunidades.
- No requiere de "reinventar la rueda" para su adopción en las redes existentes, y es una tecnología transparente, por lo que es fácil de integrar.
- Un modelo de "construir como vienen", lo que implica no hay costos hundidos.

- Escalable con respecto al ancho de banda, de 1 Mbps a 2,5 Gbps.
- Muy seguro (se desarrolló por primera vez para las comunicaciones militares seguras).
- Minimiza los requisitos de capital para una expansión.
- Equipo fiable, con un MTBF de hasta 23 años cotizados por algunos fabricantes.
- Muchos de los modelos funcionan como un puente y son de protocolo independiente.

### B. Polarización

La polarización es una característica intrínseca a las ondas electromagnéticas, de las que forma parte la luz, estas ondas son oscilaciones en el tiempo y el espacio de los campos eléctrico y magnético. Cuando se habla de ondas lumias la polarización se define como la manera específica en que el campo eléctrico de la onda electromagnética oscila en el plano ortogonal a la dirección de propagación. Esto significa que la dirección de polarización de una onda lumia es la dirección del campo eléctrico oscilante [13, 14].

El fenómeno de la polarización se observa en unos cristales determinados que individualmente son transparentes. Sin embargo, si se colocan dos en serie, paralelos entre sí y con uno girado un determinado ángulo con respecto al otro, la luz no puede atravesarlos. Si se va rotando uno de los cristales, la luz empieza a atravesarlos alcanzándose la máxima intensidad cuando se ha rotado el cristal 90° sexagesimal respecto al ángulo de total oscuridad.

También se puede obtener luz polarizada a través de la reflexión de la luz. La luz reflejada está parcial o totalmente polarizada dependiendo del ángulo de incidencia. El ángulo que provoca una polarización total se llama ángulo de Brewster. Muchas gafas de sol y filtros para cámaras incluyen cristales polarizadores para eliminar reflejos molestos[16].

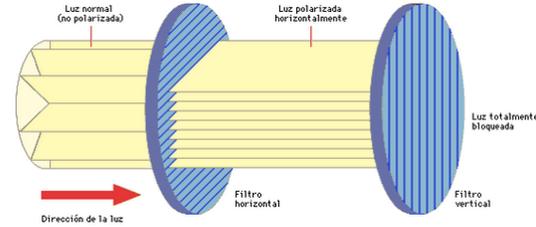


Figura 2. Polarización de la luz[15].

### C. Esparcimiento

Dispersión refiere a la "máquina de pinball" a la naturaleza de luz tratando de pasar a través de la atmósfera. La dispersión de luz puede afectar drásticamente el rendimiento de los sistemas FSO. La dispersión no está relacionada con una pérdida de energía debido a un proceso de absorción de la luz. Más bien, se puede entender como una redirección o redistribución de luz que puede conducir a una reducción significativa de la intensidad de la luz recibida en la ubicación del receptor[12].

Existen varios regímenes de dispersión, dependiendo del tamaño característico de las partículas, (R), los encuentros de luz en el viaje a su destino. Una descripción se da como

$$x_0 = 2\pi r / \lambda \quad (1)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de transmisión y  $r$  es el radio de la partícula. Para  $x_0 \ll 1$ , la dispersión está en el régimen de Rayleigh; para  $x_0 = 1$ , la dispersión está en el régimen de Mie; y para  $x_0 \gg 1$ , la dispersión puede ser manejada usando la óptica geométrica. En comparación con longitudes de onda infrarrojas que habitualmente se utilizan en la óptica de espacio abierto, el radio medio de las partículas de la niebla es aproximadamente el mismo tamaño. Esta es la razón por la que la niebla es el enemigo principal del haz. Las partículas de lluvia y nieve, por otro lado, son más grandes, y por lo tanto presente significativamente menos de un obstáculo al haz de luz.

**Pérdidas por esparcimiento de Rayleigh** Este fenómeno se produce cuando la luz choca en su camino con partículas extrañas al medio material, cuyo diámetro es considerado mucho menor que

la longitud de onda de la señal óptica, provocando que el rayo incidente se disperse en muchas direcciones. La difracción resultante absorbe parte del espectro energético de la señal óptica y produce una pérdida de energía [12, 17, 18].

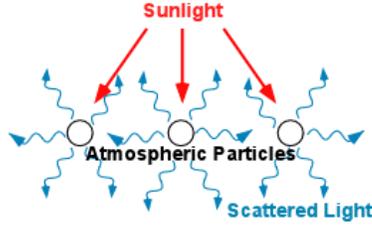


Figura 3. Espacamiento de Rayleigh[19].

La fórmula clásica de Rayleigh para la sección transversal de dispersión es como sigue:

$$\sigma_s = \frac{f e^4 \lambda_0^4}{6\pi \epsilon_0^2 m^2 c^4} \frac{1}{\lambda^4} \quad (2)$$

Donde  $f$  es la fuerza de oscilador,  $e$  es la carga de un electrón,  $\lambda_0$  es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia natural,

$$\omega_0 = 2\pi c / \lambda_0 \quad (3)$$

$\epsilon_0$ , es la constante dieléctrica,  $c$  es la velocidad de la luz, y  $m$  es la masa de la entidad oscilante. La dependencia  $\lambda^{-4}$  y el tamaño de las partículas que se encuentran en la atmósfera implican que las longitudes de onda más cortas se dispersan mucho más que las longitudes de onda más largas. La dispersión de Rayleigh es la razón por qué el cielo se ve azul en condiciones meteorológicas de sol.

Sin embargo, para sistemas de FSO que operan en el rango de longitud de onda mayor cerca de longitud de onda infrarroja, el impacto de la dispersión de Rayleigh en la señal de transmisión se puede despreciar.

**Pérdidas por espacamiento de Mie** Este fenómeno se produce cuando la luz choca en su camino con partículas extrañas al medio material, cuyo diámetro es comparable con la longitud de onda de la señal óptica, provocando que el rayo incidente se esparza principalmente hacia adelante [18].

El régimen de dispersión de Mie se produce para las partículas del tamaño de la longitud de onda. Por lo tanto, en el corto rango de longitud de onda infrarroja, niebla, neblina, y la contaminación

(partículas de aerosoles) son los principales contribuyentes al proceso de dispersión de Mie. La teoría es complicada pero bien entendida. El problema surge en la comparación de la teoría para un experimento. Debido a que la absorción domina la mayor parte del espectro, los datos deben ser recogidos en longitudes de onda que se producen en una ventana atmosférica, con la suposición de que sólo la dispersión se lleva a cabo. Además, las distribuciones de partículas deben ser conocidas[12].

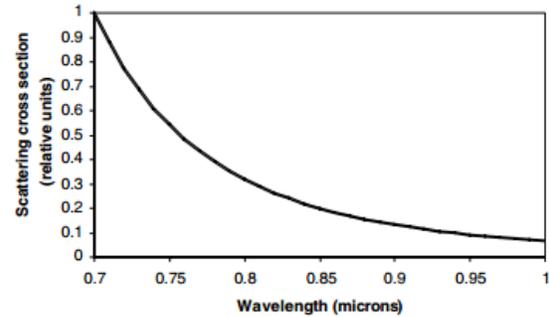


Figura 4. Sección eficaz de la dispersión de Rayleigh frente a longitud de onda infrarroja [12].

En los aerosoles, esta distribución depende de la ubicación, el tiempo, la humedad relativa, velocidad del viento, y así sucesivamente. Una fórmula empírica simplificado que se pueden encontrar en la literatura y que se utiliza en la comunidad FSO durante mucho tiempo para calcular el coeficiente de atenuación debido a la dispersión de Mie está dada por la siguiente:

$$\gamma = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-\delta}, \text{ where } \delta = 0.585(V)^{1/3} \text{ for } V < 6 \text{ Km} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \delta &= 1.6 && \text{for } V > 50 \text{ Km} \\ \delta &= 1.3 && \text{for } 6 \text{ Km} < 50 \text{ Km} \end{aligned}$$

En esta fórmula,  $V$  corresponde a la visibilidad, y  $\lambda$  es la longitud de onda de transmisión. Sin embargo, esta fórmula ha sido cuestionada recientemente por la comunidad de investigadores de FSO. La dependencia de la longitud de onda de transmisión de los  $\gamma$  coeficientes de atenuación no sigue la fórmula empírica predicha. Las simulaciones numéricas más precisa de la fórmula exacta de la dispersión de Mie sugieren que el coeficiente de atenuación no depende drásticamente la longitud de onda en cuanto a la gama de longitud de onda del infrarrojo cercano se utiliza típicamente en sistemas de FSO se refiere. La conclusión general que se puede

derivar de la observación empírica es que la dispersión de Mie causada por la niebla caracteriza a la fuente primaria de atenuación del haz, y que este efecto se acentúa geoméricamente a medida que aumenta la distancia. Para todos los efectos prácticos, las condiciones de visibilidad en el área de despliegue FSO se deben estudiar[12].

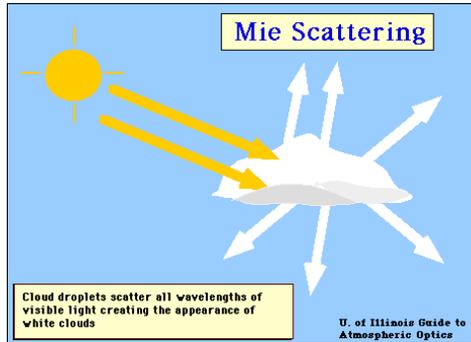


Figura 5. Espacimamiento de Mie[20].

Los datos recopilados sobre la visibilidad a lo largo de varias décadas se disponen de los Servicios Meteorológicos Nacionales y pueden ser utilizados para obtener datos de disponibilidad dependientes de la distancia para una región geográfica particular de despliegue. Sin embargo, una complicación resulta del hecho de que las condiciones meteorológicas se miden normalmente en los aeropuertos que pueden ubicarse lejos de la ubicación de la instalación real FSO. Algunos vendedores de FSO han empezado a recoger datos directamente de las áreas metropolitanas y los correlacionan estos resultados con los datos recogidos en los aeropuertos cercanos para optimizar las estadísticas de disponibilidad. Los entornos con fuertes variaciones de microclima son especialmente difíciles[12].

Para la mayoría de las implementaciones comerciales del FSO, la operación en ambientes de niebla pesada requiere mantener las distancias entre los terminales del FSO cortos para mantener altos niveles de disponibilidad. Los márgenes de potencia de enlace de la mayoría de equipos de proveedor permiten la disponibilidad que excedan del 99,99% si las distancias se mantienen por debajo de 200 m[12].

#### D. Ley de Beer y la absorción

**Ley de Beer** La ley de Beer describe la atenuación de la luz que viaja a través de la atmósfera debido tanto a la absorción y dispersión. En general, la transmisión,  $\tau$ , de la radiación en la atmósfera como una función de la distancia,  $x$ , está dado por la ley de Beer, como:

$$I_R/I_0 = \tau = \exp(-\gamma x) \quad (5)$$

Donde  $I_R/I_0$  es la relación entre el  $I_R$  intensidad detectada en la ubicación  $x$  y la intensidad  $I_0$  puesto en marcha inicialmente, y  $\gamma$  es el coeficiente de atenuación.

El coeficiente de atenuación es una suma de cuatro y coeficientes de absorción individuales parámetros moleculares y coeficientes de dispersión de aerosol de aerosol  $\alpha$  moleculares y  $\beta$ -cada uno de los cuales es una función de la longitud de onda.

El coeficiente de atenuación se da como:

$$\gamma = \alpha_m + \alpha_a + \beta_m + \beta_a \quad (6)$$

Esta fórmula muestra que la atenuación total, es representada por el coeficiente de atenuación  $\gamma$ , resultante de la superposición de varios procesos de dispersión y absorción.

**Absorción** Los átomos y las moléculas se caracterizan por su índice de refracción. La parte imaginaria del índice de refracción,  $k$ , está relacionado con el coeficiente de absorción,  $\alpha$ , por lo siguiente:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \sigma_a N_a \quad (7)$$

Donde  $\sigma_a$  es la sección transversal de absorción y  $N_a$  es la concentración de las partículas absorbentes. En otras palabras, el coeficiente de absorción es una función de la fuerza de absorción de una especie dada de partículas, así como una función de la densidad de la partícula[12].

### *E. Fenómenos atmosféricos*

**El impacto del Clima** La presencia de cuerpos atmosféricos implica el modelado de la compleja interacción de la luz a lo largo del medio en el cual está altamente esparcido las partículas de agua y aire. La dispersión de estas partículas crean muchos fenómenos ópticos atmosféricos conocidos, incluyendo arco iris, halos, la corona y la gloria [21].

Uno de los temas prácticos de mayor interés para los diseñadores e implementadores de sistemas FSO es el clima.

**Lluvia** La lluvia tiene una distancia de reducción impactante en FSO, aunque su impacto es significativamente menor que la de niebla. Esto es porque el radio de las gotas de lluvia (200-2000 $\mu$ m) es significativamente mayor que la longitud de onda de las fuentes de luz típicas de FSO.

Los típicos valores de atenuación de lluvia son moderados. Por ejemplo, para una precipitación de 2,5 cm / hora, una atenuación de la señal de 6 dB / km se puede observar. Por lo tanto, los sistemas de FSO disponibles comercialmente que operan con un margen de enlace 25 dB pueden penetrar la lluvia relativamente sin obstáculos. Este es especialmente el caso cuando se despliegan los sistemas en las áreas metropolitanas donde las distancias de construcción son generalmente mucho menos de 1 km. Si, por ejemplo, el sistema se despliega sobre una distancia de 500 m en las mismas condiciones de lluvia, la atenuación es sólo 3 dB / km. Sin embargo, cuando las tasas de lluvia aumenta drásticamente a más allá del nivel aguacero (> 10 cm / hora), atenuación por lluvia pueden convertirse en un problema en los despliegues más allá de la escala de distancias de un área metropolitana típica. Sin embargo, este tipo de aguaceros dura sólo por un corto período de tiempo (minutos)[12].

Un punto interesante a destacar es que las tecnologías inalámbricas de radiofrecuencia que utilizan frecuencias por encima de aproximadamente 10 GHz se ven afectados negativamente por la lluvia y poco afectados por la niebla. Esto es debido a la coincidencia más estrecha de longitudes de onda de RF al radio de

las gotas de agua, siendo ambos más grandes que las gotas de humedad en la niebla. Las frecuencias de RF menor sin licencia en los rangos de 2.4 GHz y 5.8 GHz son relativamente poco afectada por la lluvia o niebla, pero incurrir en riesgos significativos de interferencia por la naturaleza de la falta de concesión de licencias en esas frecuencias[12].

**Nieve** Los copos de nieve son cristales de hielo que vienen en una variedad de formas y tamaños. En general, sin embargo, la nieve tiende a ser mayor que la lluvia. Las condiciones de desorientación (pérdida de la visibilidad y sentido de dirección y distancia) podrían atenuar el haz pero la dispersión no tiende a ser un gran problema para los sistemas de de FSO porque el tamaño de los copos de nieve es grande en comparación con la longitud de onda de funcionamiento. El impacto de la nieve ligera a tormenta de nieve y condiciones de desorientación cae aproximadamente entre lluvia ligera a niebla moderada, con un potencial de atenuación de enlace de aproximadamente 3 dB / km a 30 dB / km[12].

**Niebla** La niebla es el fenómeno del tiempo más perjudicial para de FSO porque está compuesto de pequeñas gotas de agua con radios sobre el tamaño de las longitudes de onda del infrarrojo cercano. La distribución del tamaño de partícula varía para los diferentes grados de niebla. Las condiciones climáticas se refieren típicamente como la niebla cuando la visibilidad oscila entre 0-2,000 metros. Debido a condiciones de niebla son algo difícil de describir por medios físicos, palabras descriptivas como "densa niebla" o "neblina" a veces se utilizan para caracterizar la aparición de niebla. Cuando la visibilidad es de más de 2.000 metros, la afección se le conoce a menudo como nebulosa[12].

La tabla 1 relaciona la visibilidad y diferentes condiciones de la niebla. La dispersión es el mecanismo de pérdida dominante por la niebla. Incluso las condiciones de niebla modestos pueden altamente atenuar las señales infrarrojas en distancias más cortas. La atenuación del trayecto esperado en dB / km y su correlación con la visibilidad se muestra en la tabla. La tabla también ilustra claramente que la lluvia tiene mucho menos impacto en pérdidas de trayectoria en

sistemas FSO en comparación con la niebla. Por ejemplo, se produce una precipitación media en una menor atenuación de una niebla fina [12].

TABLA I. RELACIÓN ENTRE LA VISIBILIDAD Y LAS DIFERENTES CONDICIONES DE LA NIEBLA[12].

International Visibility Codes for Weather Conditions and Precipitation					
Weather Condition	Precipitation	Amount mm/hr	Visibility	dB Loss/km	
Dense fog			0 m, 50 m	-271.65	
Thick fog			200 m	-59.57	
Moderate fog	snow		500 m	-20.99	
Light Fog	snow	Cloudburst	100	770 m	-12.65
				1 km	-9.26
Thin fog	snow	Heavy rain	25	1.9 km	-4.22
				2 km	-3.96
Haze	snow	Medium rain	12.5	2.8 km	-2.58
				4 km	-1.62
Light haze	snow	Light rain	2.5	5.9 km	-0.96
				10 km	-0.44
Clear	snow	Drizzle	0.25	18.1 km	-0.24
				20 km	-0.22
Very Clear				23 km	-0.19
				50 km	-0.06

La neblina no se comprende bien, y es difícil de caracterizar físicamente. Aunque la visibilidad es más comúnmente utilizada para caracterizar las condiciones de niebla, se han realizado otros métodos tales como mediciones del tamaño de las partículas y la densidad para describir las condiciones de niebla de una manera más cuantitativa. La comunidad de FSO utiliza principalmente datos de visibilidad debido a que estas medidas se han tomado en los principales aeropuertos durante muchas décadas. Hasta cierto punto, estas medidas le permiten caracterizar las diferentes regiones y derivar las cifras estadísticas sobre la disponibilidad de los sistemas FSO. Sin embargo, la mayoría de los datos ha sido el tiempo promedio durante años; En general, la resolución temporal de estos puntos de datos no es muy alta[12].

Ya que los entornos de microclima, tales como estanques o ríos pueden inducir condiciones de niebla, los datos tomados en los aeropuertos a veces no es fiable para entornos cercanos. Sin embargo, se ha demostrado que la visibilidad en los aeropuertos proporciona una buena estimación de la cifra mínima disponibilidad esperable. Esto se debe a que los aeropuertos normalmente se encuentran fuera de los límites metropolitanos, y el microclima dentro de una ciudad típicamente genera condiciones menos niebla[12].

La distribución de la densidad de las partículas de niebla también puede variar con la altura, lo que

hace que el modelado de la niebla aún más complejo. La cantidad limitada de información sobre el impacto local de la niebla en la disponibilidad de los sistemas de FSO es sin duda uno de los mayores desafíos para la industria de FSO[12].

#### F. Problema

**Declaración del problema** ¿Cuánta distancia puede alcanzar el haz del diodo sin que se pierda o distorsiona la información debido a los fenómenos atmosféricos?

**Definición del problema** Debido a los distintos fenómenos atmosféricos la información puede llegar a atenuarse, a distorsionarse, perderse parcialmente o indefinidamente; todo esto por la lluvia, niebla, nieve, nubes densas, la luz fluorescente y también la luz solar. Los cuales se pretenden simularlos para ver cómo se comporta la señal a través de estos medios.

**Justificación del problema** Las comunicaciones ópticas a espacio abierto (COEA) o Wireless no son relativamente nuevas, pero si nuevas en la aplicación de estas. Al ver que estas son más factibles y económicas le dan una gran ventaja sobre las antenas Wireless.

Las ventajas de utilizar un láser es el ser inmunes a la interferencia electromagnética, su velocidad de transmisión al transmitir cantidades enormes. Claramente también tiene desventajas las cuales son generadas por fenómenos atmosféricos.

Lo que estudiaremos será el comportamiento del haz laser a través de estos medios, simularlos para conocer su comportamiento en los fenómenos como la lluvia, niebla, la luz fluorescente y solar.

La COEA no solo es aplicable para transmisiones satélites o espacios atmosféricos, también se pueden aplicar en espacios controlados o cortó alcance, por ejemplo de un edificio a otro.



Figura 6. Ejemplo de la aplicación de FSO[22].

Los equipos para controlar COEA son significativamente más accesibles que las antenas de transmisión o que la fibra óptica las cuales pueden superar 3 veces más el costo de la instalación de los equipos. Aparte de la instalación de COEA es rápida y menos laboriosa, otra de sus ventajas es cuando se desgasta el equipo o la reparación de estos es fácil componerlo o adquirirlo [23].

#### G. Objetivos

- Estudiar los efectos causados en un ambiente controlado simulando algunos fenómenos atmosféricos, para analizar el comportamiento tanto del haz láser como el de las informaciones moduladas aplicadas a sistemas de comunicación en espacio abierto.
- Ver el comportamiento en el haz del diodo, al atravesar los polarizadores en medio de la transmisión y medir los voltajes obtenidos.
- Observar el comportamiento del diodo, al atravesar un recipiente con un agente emulsificante, y medir las salidas del foto receptor.

#### H. Pregunta e hipótesis

Se sabe que las comunicaciones ópticas a espacio abierto se ven limitadas por los medios físicos, lo cual nos lleva al siguiente cuestionamiento.

¿Qué efectos causa el esparcimiento en la transmisión de información a través del espacio abierto, tomando en cuenta los fenómenos atmosféricos más concurrentes?

#### I. Limitaciones y delimitaciones

**Limitaciones** El equipo necesario que se ocupa para hacer los experimentos no se encuentra disponible en México y si tenemos una falla o se avería, el tiempo de espera para conseguir los componentes se extiende de manera que provoca que la investigación se alargue o se prolongue.

**Delimitaciones** El rango del espectro del estudio es muy pequeño debido a que tiene que ser visible y eso delimita el área de operación.

El ancho de banda por un diodo laser es de 155 Mbps por lo tanto la transmisión de datos no

puede ser a tan altas velocidades como un haz laser.

La distancia de transmisión que alcanza el diodo es de 400 m. (1/4 de milla).

El kit educativo Lbc6k solo puede transmitir audio.

#### J. Definición de términos

**Polarización:** También se debe al carácter ondulatorio de la luz. La luz puede considerarse como un conjunto de ondas que se desplazan en planos de todas las direcciones perpendiculares a la dirección de movimiento. Bajo ciertas circunstancias las ondas de luz se ven obligadas a vibrar en un solo plano. Esta luz se llama polarizada y el plano restante es el de polarización. Los tipos de polarización más comunes son el lineal y el circular, que indican la proyección del plano de desplazamiento de la onda.

**Esparcimiento:** La extracción de energía de una onda incidente y la reemisión subsecuente de alguna porción de esa energía se conoce como esparcimiento.

**Comunicación óptica de espacio libre:** Óptica de espacio libre (FSO), también llamada Red Wireless Optical (WON) o Wireless Optical, se refiere a la transmisión de rayos láser modulados a través de la atmósfera para obtener comunicaciones de banda ancha.

**Fenómenos atmosféricos:** son todas aquellas actividades que ocurren en la atmósfera de manera natural, tengan o no relación con el clima.

**Polarizadores:** Un aparato óptico cuya entrada es luz natural y cuya salida es alguna forma de luz polarizada.

## II. APORTES AL PROYECTO

### A. Diseño de las bases del sistema de comunicación.

Se contruyo una base para que el sistema de comunicación se fijaran juntos para que a la momento de cambiarlas de lugar no se desajustara la posicion de estos, y seguirse viendo de frente.

Las bases son de madera, la base principal mide 53.3 cm de largo por 7 cm de ancho y 1 cm de grosor, la base individual del receptor mide 19.3 cm de largo por 9.7 cm de ancho y 1 cm de grosor y la base individual del emisor mide 27.3 cm de largo por 9.7 cm de ancho y 1 cm de grosor.

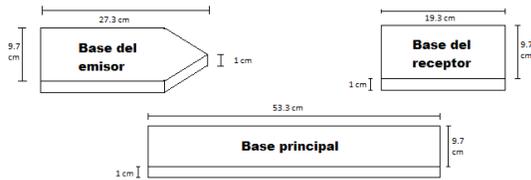


Figura 7. Diseño de las bases del sistema de comunicación láser.

Una vez terminadas las bases se colocaron tanto el emisor como el receptor estos se alinearon se ajustaron de tal forma que estos se vieran de frente para una mejor transmisión.



Figura 8. Laser Beam Audio Communicator colocado en las bases.

### B. Sistema de comunicación láser

El sistema de comunicación que se utilizó fue un Laser Beam Audio Communicator Kit modelo LBC6K.). El emisor tiene un circuito con un apuntador láser comercial con longitud de onda de 650nm y .5mW de potencia. El receptor es un circuito con un fotodiodo.

Alcanza hasta 400 m (1/4 de milla).

Su ancho de banda es de 6 kHz, siendo mayor que la del teléfono que trabaja a 3kHz.

El transmisor utiliza un micrófono o una entrada de audio externo para modular un haz de láser encendido y apagado a una velocidad de más de 16 kHz de modo que la fidelidad de audio es mucho mejor que la de un teléfono.

El sistema del transmisor emplea audio AGC en el micrófono para aumentar el audio débil y reducir el audio fuerte, para que el oyente nunca pierda una palabra dicha[24].

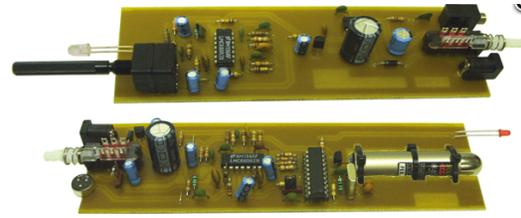


Figura 9. Laser Beam Audio Communicator Kit Model # LBC6K[24].

### C. Método de esparcimiento

El experimento se llevó a cabo dentro de un cuarto aislado de luz para que no hubiera ninguna interferencia o ruido en la transmisión del audio por medio del sistema de comunicación.

Se colocó en medio del receptor y el emisor un recipiente con una constante de agua de 10 ml, se hicieron pruebas antes del empezar para ver que tal era la calidad de audio y todo marchaba bien, la calidad se encontraba en buena calidad, libre de ruido e interferencia.



Figura 10. El esparcimiento en la solución el agente emulsificante.

Para la adquisición de datos y realizar las medidas se utilizó un osciloscopio Tectroniks TDS 2012 con el cual podemos ver el comportamiento de la señal y medirla.

Una vez todo listo se fue vertiendo agente emulsificante de tal forma que este hiciera el ambiente más turbio en el recipiente de forma de que se pueda ver una diferencia significativa. El agente emulsificante es una sustancia que ayuda a que dos sustancias diferentes se puedan revolver

equitativamente, debido a que nosotros utilizamos un producto que ya contiene este agente al combinarla con agua, ayuda a modificar la claridad del agua, haciendo de esta más turbia o sucia, de tal forma de reducir la visibilidad. En la siguiente tabla se puede ver la relación del agente de turbidez y el voltaje de la señal en el receptor.

TABLA II. DATOS ADQUIRIMOS EN EL MÉTODO DE ESPARCIMIENTO

Agua	Agente E.	Vpp	Vrms	Frecuencia
10 ml	0	82 mv	27 mv	15.6 KHz
10 ml	2.5 ml	10 mv	15 mv	2 MHz
10 ml	5 ml	12 mv	15 mv	2 MHz
10 ml	7.5 ml	14 mv	13 mv	2 MHz

#### D. Método de polarización

El experimento de igual manera se llevó a cabo dentro de un cuarto aislado de luz para que no hubiera ninguna interferencia o ruido en la transmisión del audio por medio del sistema de comunicación.

Este consistió en poner los polarizadores en medio del receptor y el emisor láser. El primer polarizador iniciando desde el emisor láser se puso fijo y el segundo polarizador se movía de tal forma que se pudieran medir los grados de movimiento.

Para la adquisición de datos y realizar las medidas de la misma manera se utilizó un osciloscopio Tectronics TDS 2012 con el cual podemos ver el comportamiento de la señal y medirla.

Puesto todo en su lugar se fue girando uno de los polarizadores para ver su comportamiento, en la siguiente tabla se puede ver su rendimiento durante el experimento.

TABLA III. DATOS ADQUIRIDOS EN EL MÉTODO DE POLARIZACIÓN

Grados °	Vpp	Vrms	Frecuencia
0°	94 mv	30 mv	15.6 KHz
10°	94 mv	30 mv	15.6 KHz
20°	90 mv	30 mv	15.6 KHz
30°	90 mv	30 mv	15.6 KHz
40°	85 mv	28 mv	15.6 KHz
50°	80 mv	25 mv	15.6 KHz
60°	70 mv	20 mv	15.6 KHz
70°	52 mv	15 mv	30 KHz
80°	25 mv	5 mv	200 KHz
90°	10 mv	3 mv	2 MHz

#### E. Resultados

**Método de esparcimiento** Se observó que cada vez que se introducía mas agente emulsificante en el recipiente con la constante de agua, la intensidad de la señal disminuía grandemente mientras que la frecuencia iba en aumento. Por otro lado la calidad se mantenía se escuchaba claramente, pero cada vez se escuchaba más lejos debido a que la intensidad de la señal disminuía.

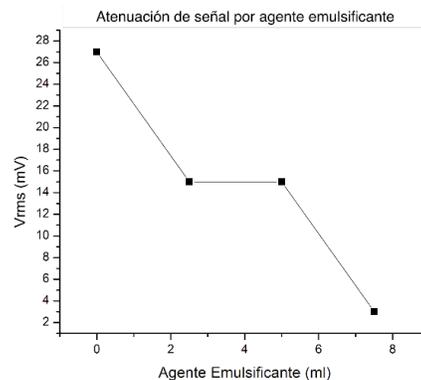


Figura 11. Atenuación de la señal en relación con la cantidad de agente emulsificante.

**Método de polarización** Se vio que al girar el segundo polarizador cada 10 grados iba disminuyendo la intensidad de la señal gradualmente hasta llegar a los 80° fue donde

drásticamente la señal se redujo en gran manera de solo llegar el 10% de la señal total, mientras que la frecuencia se mantenía hasta cierto punto y luego aumento grandemente.

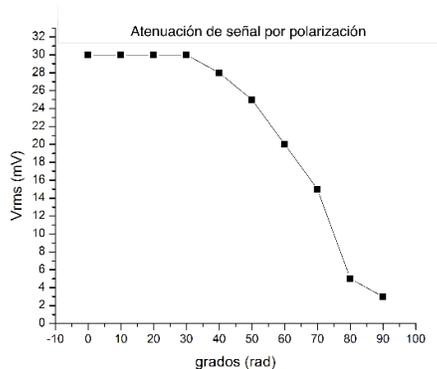


Figura 12. Atenuación de la señal en relación con los grados de giro de los polarizadores.

### III. CONCLUSIONES

#### A. Conclusiones de la investigación

Al concluir con la fase de experimentación con los métodos de polarización y esparcimiento se da por conclusión que ciertamente existe una limitante en el transmisión del haz laser a través del medio.

En el método de esparcimiento se puede notar que parte de la señal es absorbida por el medio y redirigida a otras direcciones y una pequeña parte de esta logra llegar a su destino.

En el método de polarización se puede observar que hay un grado específico donde gran parte de la señal es absorbida por los polarizadores emulando así el medio donde constantemente se ve la gran problemática absorción, entre más avanza la señal más riesgo de ser absorbida

#### B. Reflexión

Me siento satisfecho con el aporte que pude realizar al proyecto de “Estudio de los Efectos Atmosféricos en Comunicaciones Ópticas en Espacio Abierto”, considero que es una excelente oportunidad para poder desarrollarse en un área distinta a la cual no se tiene el enfoque o experiencia, conocer los procedimientos y métodos para poder realizar una investigación así

como adquirir habilidades para llevar a cabo una investigación.

Las experiencias vividas en el desarrollo de esta investigación fueron variadas y diversas, pude compartir y recibir conocimiento de otras áreas de la ciencia como la medicina y la óptica.

El ambiente de trabajo en el cual se desarrolló el proyecto fue esencial ya que la convivencia con un equipo multidisciplinario te brinda la oportunidad de tener una constante retroalimentación en el proyecto.

Considero que esta experiencia profesional me da las experiencias y herramientas para el entorno laboral. Esto forma parte de mis logros académicos.

#### C. Recomendaciones

Para darle seguimiento al proyecto debe de tomarse en cuenta otros efectos atmosféricos, como también utilizar otras sustancias para ver el comportamiento del haz en estas.

Llevar estas mismos métodos pero en un sistema de comunicación distinto, el cual transmita en más de un canal, ver el comportamiento tanto del audio y video.

Conseguir refacciones para los sistemas de comunicación para cualquier percance.

#### D. Futuros Aportes

Para los futuros aportes al proyecto sugiero llevar a cabo una transmisión de audio y video en vivo, de un edificio a otro. Mantener el canal operando al 99.9%.

Establecer el sistema de comunicación en los edificios operando.

Realizar mediciones con el sistema operando en cada una de los efectos atmosféricos que se presenten.

## REFERENCIAS

- [1] J. Grubor, S. Randel, K.-D. Langer, and J. W. Walewski, "Broadband information broadcasting using LED-based interior lighting," *Journal of Lightwave technology*, vol. 26, pp. 3883-3892, 2008.
- [2] G. S. Romo, M. Marchena, and O. Galarza, "Comunicaciones Ópticas en Espacio Abierto," *Congreso Nacional de Física*, vol. LIV, 2011.
- [3] S. Bloom, E. Korevaar, J. Schuster, and H. Willebrand, "Understanding the performance of free-space optics," *JOURNAL OF OPTICAL NETWORKING*, vol. 2, pp. 178-200, 2003.
- [4] H. Henniger and O. Wilfert, "An introduction to free-space optical communications," *Radioengineering*, vol. 19, pp. 203-212, 2010.
- [5] S. Das, H. Henniger, B. Epple, C. I. Moore, W. Rabinovich, R. Sova, *et al.*, "Requirements and challenges for tactical free-space lasercomm," in *Military Communications Conference, 2008. MILCOM 2008. IEEE*, 2008, pp. 1-10.
- [6] A. Paraskevopoulos, J. Vucic, S.-H. Voss, R. Swoboda, and K.-D. Langer, "Optical wireless communication systems in the Mb/s to Gb/s range, suitable for industrial applications," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 15, pp. 541-547, 2010.
- [7] W. O. Popoola and Z. Ghassemlooy, "BPSK subcarrier intensity modulated free-space optical communications in atmospheric turbulence," *Journal of Lightwave technology*, vol. 27, pp. 967-973, 2009.
- [8] G. Ntogari, T. Kamalakis, and T. Sphicopoulos, "Analysis of indoor multiple-input multiple-output coherent optical wireless systems," *Journal of Lightwave technology*, vol. 30, pp. 317-324, 2012.
- [9] A. Aladeloba, A. Phillips, and M. Woolfson, "Improved bit error rate evaluation for optically pre-amplified free-space optical communication systems in turbulent atmosphere," *IET optoelectronics*, vol. 6, pp. 26-33, 2012.
- [10] L. Dordová and O. Wilfert, "Calculation and comparison of turbulence attenuation by different methods," *Radioengineering*, vol. 19, pp. 162-167, 2010.
- [11] S. Bicheno. (2010). *Can free space optics solve the backhaul crunch?* Available: <http://hexus.net/business/features/telcos/24742-can-free-space-optics-solve-backhaul-crunch/>
- [12] H. Willebrand and B. S. Ghuman, *Free space optics: enabling optical connectivity in today's networks*: Sams Publishing, 2002.
- [13] E. I. Estrada Barrios, "Caracterización Experimental de la Polarización de la Luz en Fibras Ópticas," 2014.
- [14] O. O. Óptica and E. d. F. S. Medellín, "POLARIZACIÓN DE LA LUZ 1 Objetivo general." (2015). *Polarización*. Available: <http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/21/Polarizaci%F3n.html>
- [16] M. G. S. Guerra, "ÓPTICA FÍSICA: Interferencia, difracción y polarización," in *Temas de Física*, ed, 2012.
- [17] W. Tomasi, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*: Pearson educación, 2003.
- [18] H. A. Guano Hidalgo and P. C. Molina Avalos, "Estudio y Simulación de los efectos no lineales-Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado de Raman (SRS)," QUITO/EPN/2013, 2013.
- [19] D. o. A. S. D. a. t. U. o. I. a. Urbana-Champaign. (2010). *Scattering*. Available: [http://ww2010.atmos.uiuc.edu/\(Gh\)/guides/mtr/opt/mch/sect\\_rxml](http://ww2010.atmos.uiuc.edu/(Gh)/guides/mtr/opt/mch/sect_rxml)
- [20] W. Edge. (2001). *Scattering*. Available: <http://www.severewx.com/Radiation/scattering.html>
- [21] K. Riley, D. S. Ebert, M. Kraus, J. Tessendorf, and C. Hansen, "Efficient rendering of atmospheric phenomena," in *Proceedings of the Fifteenth Eurographics conference on Rendering Techniques*, 2004, pp. 375-386.
- [22] S. Informatics. (2008). *Free Space Optics*. Available: <http://www.surajinformatics.com/fso-free-space-optics.htm>
- [23] Z. X. Xu Guoliang, Xu Weihong, DingTieqi, "Free Space Optical Communication," *Optoelectronic Technology*, vol. 4, p. 002, 2002.
- [24] R. Electronics. (2014). *Laser Beam Audio Communicator Kit*. Available: <http://www.ramseyelectronics.com/Laser-Beam-Audio-Communicator-Kit/dp/B0002NRK58>

## APÉNDICES

### 1. LVI Congreso de Nacional de Física 2013

México, D.F. 17 de Agosto de 2013

Gerardo Romo Cardenas  
Fac. de Ingeniería, Universidad de Montemorelos

Me es grato comunicarle que el trabajo con número de registro 0135 y cuyo título es:  
"Estudio de Simulación los Efectos de Atmosféricos en Comunicaciones Ópticas en Espacio Abierto",

de los autores:

Gerardo Romo Cardenas  
Hugo Alvarez  
Enoc Gallegos

ha sido aceptado para su presentación en el LVI CONGRESO NACIONAL DE FÍSICA, que se celebrará en San Luis Potosí, S.L.P., del del 28 de octubre al 1 de noviembre de 2013, posteriormente recibirá fecha y hora de su sesión.

ATENTAMENTE

The logo for the Sociedad Mexicana de Física (SMF) features the letters 'SMF' in a bold, green, sans-serif font. To the left of the letters is a stylized green graphic consisting of several curved lines that suggest a signal or a wave.

Ma. Luisa Marquina Fábrega.  
Comité Organizador  
LVI Congreso Nacional de Física

Departamento de Física, 2o piso Facultad de Ciencias UNAM, CP 04510 Ciudad Universitaria México, D.F.



Sociedad Mexicana de Física

Apartado Postal 70-348 Delegación Coyoacán  
04511 México, D.F.  
Tels./Fax: (52 55) 5622 - 4993 ♦ 5622 - 4840 ♦ 5622 - 4946  
<http://www.smf.mx/>  
[smf@hp.ciencias.unam.mx](mailto:smf@hp.ciencias.unam.mx)

