



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA IMPULSIVA EN CANALES
FSO”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MÁSTER EN TELECOMUNICACIONES

DANIEL FERNANDO SÁNCHEZ DEL PINO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO: 2017

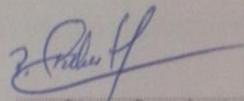
AGRADECIMIENTO

Mis más sinceros agradecimientos a mis padres, mis amigos, mi tutor, mis profesores y todas las energías positivas que me han dado una motivación especial para hacer realidad este proyecto.

DEDICATORIA

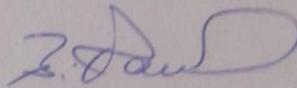
El presente proyecto lo dedico a todos quienes me rodean y son una influencia predominantemente positiva para los demás, en especial a quienes contribuyen al desarrollo material de la sociedad.

TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



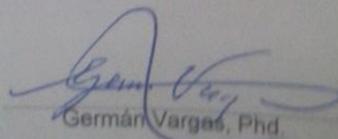
Sixto García Aguilar, Phd.

SUBDECANO



Boris Ramos, Phd.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

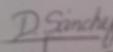


Germán Vargas, Phd.

MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Daniel Sánchez Del Pino

RESUMEN

Un sistema FSO permite integrar las altas tasas de transmisión de los enlaces cableados modernos con la movilidad y no bloqueo de un enlace inalámbrico. Durante este trabajo se modeló y se simuló, bajo la plataforma de MATLAB, la respuesta a impulso de un sistema FSO. Se trabajó con la respuesta de impulso del terminal emisor, no la del canal FSO ni la del terminal receptor; y dicha respuesta de impulso fue el parámetro de entrada del canal FSO. Dicha respuesta a impulso servirá como base para modelar y simular cualquier sistema FSO lineal con los efectos analizados durante este trabajo. Luego se realizó un repaso a los conceptos teóricos relevantes al modelamiento y posteriormente la simulación del sistema, los cuales incluyen reflexión y refracción de la luz, la reflexión de la luz a través de la atmósfera, coeficientes de reflexión y de transmisión, la función gaussiana en dos dimensiones, la Ley de Beer que explica la absorción de la luz en soluciones químicas líquidas y gaseosas, teoría sobre lentes ópticos.

Con las anteriores ideas de este resumen tomadas en consideración, se citan diferentes fuentes de luz y diferentes fotorreceptores, y se seleccionan los más apropiados. La potencia del haz emitido 5mW, el ángulo de apertura de la emisión 7.5°, y la longitud de onda de transmisión 1,55 μm se toman en cuenta como parámetros de entrada de la simulación del sistema. Se usaron parámetros de entrada estimados para las condiciones urbanas y climáticas de la ciudad de Guayaquil, con visibilidad de 1 kilómetro de niebla y de 10 kilómetros por polvo y aerosoles, como parámetros de entrada. Se empleó el mismo programa para analizar por separado la atenuación por no uso de lentes colimadores, por lluvia, por niebla, por obstaculización parcial y por polvo y aerosoles; para determinar gráficamente la respuesta en distancia, en longitud de onda, en visibilidad, en precipitación, en porcentaje de obstaculización entre los terminales del sistema. Se obtiene una transmisión adecuada de -4,34 dBm para niveles de lluvia bajos de 0,2 mm/h, y de -60,00 dBm para lluvia fuerte de 100 mm/h. Se configuraron los parámetros para simular un escenario de transmisión de televisión digital en Guayaquil, al simularse bajo nivel de niebla y lluvia bajos se obtuvo una señal aceptable de -25,4 dBm.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA.....	v
RESUMEN.....	vi
CAPÍTULO 1.....	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Planteamiento del problema.....	2
1.4 Modelo Propuesto para la solución del problema.....	2
CAPÍTULO 2.....	4
2. ENLACE ÓPTICO EN EL ESPACIO LIBRE (FSO).....	4
2.1 Definición de FSO.....	4
2.2 Frecuencias en que FSO opera.....	4
2.3 Descripción general de la luz.....	5
2.4 Estándares internacionales que intervienen en un sistema FSO... 10	
2.4.1 Organización Internacional de Estandarización (ISO).....	10
2.4.2 Autoridad Regulatoria de las Telecomunicaciones (TRA) (UAE)	11
2.4.3 Sociedad Internacional de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE)	11
CAPÍTULO 3.....	12
3. MODELAMIENTO DEL MEDIO DE PROPAGACIÓN.....	12
3.1 Ley de Beer.....	13
3.2 Modelos atmosféricos.....	13
3.2.1 Aire Limpio.....	13

3.2.2	Niebla.....	13
3.3	Modelamiento del haz de luz emitido.....	14
3.4	Modelamiento de la lluvia.....	16
3.5	Modelamiento de aerosoles.....	17
3.6	Modelamiento de obstáculo sólido.....	18
3.7	Efectos de difusión: disco de Airy.....	19
3.8	Adaptación de los modelos atmosféricos al ambiente de Guayaquil, Ecuador.....	19
CAPÍTULO 4.....		21
4. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN.....		21
4.1	Descripción técnica de los terminales FSO.....	21
4.1.1	Módulo de emisión.....	21
4.1.2	Módulo de recepción.....	24
4.2	Lentes colimadores.....	25
4.3	Esquema del algoritmo a desarrollar.....	27
CAPÍTULO 5.....		31
5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		31
5.1	Simulación de la respuesta impulso del sistema con aire despejado	32
5.1.1	Resultados numéricos.....	34
5.1.2	Gráfico de respuesta en frecuencia.....	34
5.1.3	Gráfico de respuesta espacial.....	35
5.1.4	Análisis de resultados.....	36
5.2	Simulación de la respuesta impulso del sistema con niebla.....	37
5.2.1	Resultados numéricos.....	38
5.2.2	Gráfico de respuesta en frecuencia.....	38
5.2.3	Gráfico de respuesta espacial.....	39
5.2.4	Análisis de resultados.....	40
5.3	Simulación de la respuesta impulso del sistema con lluvia.....	40
5.3.1	Resultados numéricos.....	43

5.3.2	Gráfico de respuesta en precipitación.....	43
5.3.3	Gráfico de respuesta espacial.....	44
5.3.4	Análisis de resultados.....	45
5.4	Simulación de la respuesta impulso del sistema con aerosoles.....	46
5.4.1	Resultados numéricos.....	48
5.4.2	Gráfico de respuesta en frecuencia	48
5.4.3	Gráfico de respuesta espacial.....	50
5.4.4	Análisis de resultados.....	50
5.5	Simulación de la respuesta impulso del sistema con obstáculos.....	51
5.5.1	Resultados numéricos.....	55
5.5.2	Gráfico de respuesta espacial.....	55
5.5.3	Análisis de resultados.....	56
5.6	Simulación de la respuesta impulso del sistema en las condiciones de Guayaquil en clima seco.....	56
5.6.1	Resultados numéricos.....	56
5.6.2	Simulación para diferentes distancias.....	57
5.6.3	Simulación para diferentes longitudes de onda.....	58
5.6.4	Cálculo de la tasa de error del sistema.....	59
5.7	Simulación de la respuesta impulso del sistema en las condiciones de Guayaquil en clima lluvioso.....	62
5.7.1	Resultados numéricos.....	63
5.7.2	Simulación para diferentes distancias.....	63
5.7.3	Simulación para diferentes longitudes de onda.....	64
5.7.4	Cálculo de la tasa de error del sistema.....	66
5.8	Simulación de la respuesta impulso para una red de soporte para televisión digital terrestre.....	67
5.8.1	Resultados numéricos.....	69
5.8.2	Simulación con parámetros modificados.....	70
5.9	Rango de operación del sistema simulado.....	71
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74

BIBLIOGRAFÍA.....	76
ANEXOS	80

CAPÍTULO 1

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La comunicación inalámbrica vía RF se encuentra actualmente limitada a 300 Mbps en términos de tasa de transmisión, y los enlaces cableados (cobre, fibra óptica) a pesar de que soportan una mayor tasa de datos tienen un coste de instalación y mantenimiento por corte de cables [1]. Un sistema FSO permite integrar las altas tasas de transmisión de los enlaces cableados modernos con la movilidad y no bloqueo de un enlace inalámbrico. También, la mayor parte del espectro RF se encuentra ocupado y/o se encuentra regulado, algunas partes del espectro un usuario no paga directamente por uso, como en el caso del Wifi.

1.1 Antecedentes

Un sistema de comunicación óptica no guiada permite solventar los problemas citados. Sin embargo, los terminales que se utilizan tienen un costo muy elevado [2], lo cual repercute en un bajo margen de error a la hora de diseñar un sistema de comunicación de este tipo. Lo que implica que el sistema deba modelarse y simularse antes de su implementación, y esta simulación debe ser una aproximación fidedigna de la realidad, con el fin de minimizar la probabilidad de fallos a la hora de implementar un sistema de esta naturaleza. Tendrá que simularse un sistema, cuyo modelamiento se basa en matrices y elementos de cálculo diferencial, integral y vectorial; para ello se deberá usar una plataforma apropiada. Se ha estandarizado el uso de la tecnología FSO [8][10], y se han realizado trabajos diversos para determinar los efectos atmosféricos sobre una transmisión en FSO [13-18]. Adicionalmente, se ha redactado un libro que incluyen técnicas de modelamiento en MATLAB para sistemas FSO [35].

1.2 Justificación

Los sistemas FSO (Free Space Optics) permiten la interconexión de redes mediante sistemas de muy alta velocidad en enlaces punto a punto, sin necesidad de adquirir una licencia, por operar en el rango de la luz visible y del NIR (Infrarrojo Cercano). Sus aplicaciones van desde la interconexión de edificios hasta la

creación de redes de soporte para sistemas broadcast como puede ser la Televisión Digital Terrestre. Este proyecto consistirá en simular la respuesta de impulso de un sistema FSO, dado que con la respuesta impulso de cualquier sistema lineal puede hallarse la salida a cualquier tipo de entrada. Por lo cual, esta respuesta impulso servirá como base para diseñar sistemas bajo FSO bajo diferentes esquemas de modulación.

1.3 Planteamiento del Problema

Se desea simular el comportamiento de un sistema óptico en espacio libre ante la emisión de una señal de impulso. Se trabajará con la respuesta de impulso del terminal emisor, no la del canal FSO ni la del terminal receptor. Para ello se divide el sistema en etapas, siendo la generación de la señal la primera etapa y los efectos ambientales que distorsionan la señal cada una de las siguientes etapas. El escenario será planteado en función de elementos electrónicos y ópticos típicos y aproximado a las condiciones ambientales de la ciudad de Guayaquil.

La simulación podrá ser almacenada como una librería digital para poder ser utilizada para futuros proyectos que incluyan el diseño de sistemas más completos basados en FSO, bajo el lenguaje de programación que se utilice para realizar tal simulación. Una de las simulaciones incluirá parámetros propios de un enlace FSO que pueda utilizarse como sistema de soporte de la televisión digital terrestre. Otro aspecto diferenciador, es el empleo de modelos climáticos apropiados para Guayaquil, Ecuador.

1.4 Modelo Propuesto para la Solución del Problema

Se realizará un modelado cuantitativo del pulso de luz que se propaga en el espacio libre bajo el lenguaje de programación M (basado en Java) que emplea MATLAB. MATLAB nos provee las herramientas computacionales y funciones matemáticas para simular un sistema, cuyo modelamiento se basa en matrices y elementos de cálculo diferencial, integral y vectorial. Bajo estos criterios pragmáticos se elige MATLAB como herramienta de simulación. Se analizarán, modificando sus parámetros fundamentales como potencia emitida frecuencia y ángulo de disparo, las características del pulso de luz en sus diferentes etapas; emisión, propagación, recepción, demodulación.

El pulso de luz estará descrito por una aproximación de la ecuación de onda, para frecuencias en el rango de la luz visible. Diferentes modelos de atenuación y difusión por lluvia, aerosoles, gases y turbulencia serán tomados en consideración para el modelamiento. Las características descritas en los datasheets de los terminales FSO serán tomadas en cuenta para modelar el emisor y el receptor. La simulación dividirá cada etapa en un bloque distinto, como se ilustra en la Figura 1.1 ubicada a continuación de este párrafo, ordenándose de la manera siguiente: generación del haz de luz gaussiano, recepción del haz teniendo en cuenta atenuación atmosférica y la apertura del cono de irradiación, efecto de la lluvia, efecto de la niebla, efecto de aerosoles, efecto de un obstáculo que bloquee parcialmente la línea de vista.

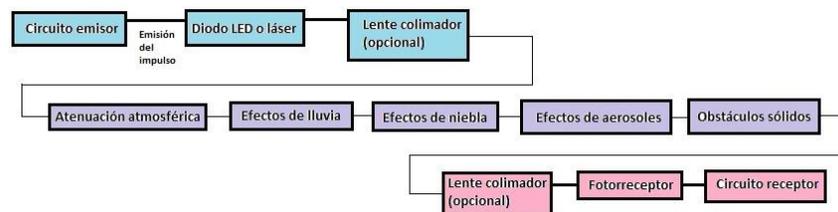


Figura 1.1: Diagrama de bloques del sistema FSO

CAPÍTULO 2

2. ENLACE ÓPTICO EN EL ESPACIO LIBRE

En este capítulo se repasan los conceptos teóricos básicos sobre los que se basa este trabajo y las regulaciones internacionales concernientes a sistemas FSO. Los conceptos teóricos que se repasarán son el espectro electromagnético y el lugar que en él operan los sistemas FSO, la reflexión y la refracción de la luz y la relación entre la longitud de onda y la frecuencia de una señal FSO.

2.1 Definición de FSO

Un enlace óptico en espacio libre, con sus siglas en inglés FSO (Free Space Optics), es un enlace de telecomunicaciones en el que la luz se propaga de manera no guiada a través de un medio cuyo efecto sobre la señal propagada es similar al del vacío. Estos medios pueden incluir el aire, el espacio exterior o el vacío. Estos enlaces se usan en donde los costos de instalación y soporte de fibra óptica la hacen impráctica. Un archivo desclasificado del Pentágono [3] muestra que láseres de espacio libre han sido montados sobre aviones militares israelitas en 1987 para fines de vigilancia y trazo de misiles.

De momento, tras haber consultado revistas especializadas en el país, y haber consultado informalmente a personas particulares, no hay evidencia de que los sistemas FSO se usen en territorio ecuatoriano. Sin embargo, en América del Norte y Europa occidental su uso se encuentra popularizado en cuanto a comunicaciones entre edificios de campus universitarios, industrias y matrices empresariales en zonas céntricas de las ciudades.

2.2 Frecuencias en que FSO opera

Los sistemas FSO se han ideado para operar dentro de las bandas de luz visible y el infrarrojo cercano (NIR). La banda de la luz visible se encuentra entre 400 y 800 THz (780–375 nm), como se muestra en la Figura 2.1 a continuación. La banda de infrarrojo cercano (NIR) se halla entre los 780 nm, que corresponde al

color rojo de la luz visible, y los 10 μm . Se producen típicamente LEDs y láseres entre 850 nm y 1700 nm.

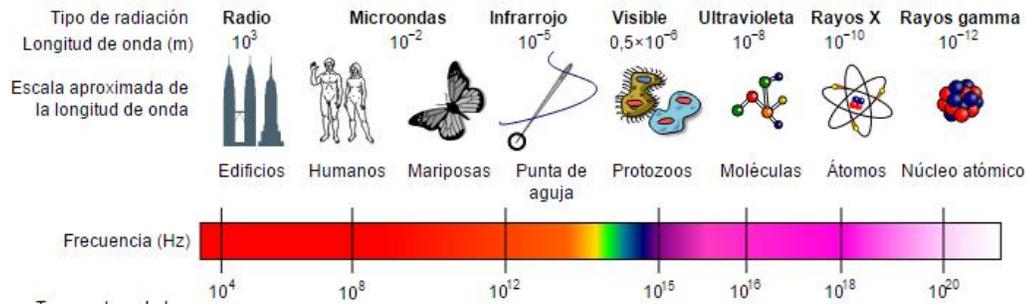


Figura 2.1: Espectro electromagnético

2.3 Descripción general de la luz

La luz, físicamente, es una colección de partículas sin masa denominadas fotones que viajan a través del espacio vibrando a una frecuencia determinada. Dicha vibración ocurre a una frecuencia fija, y dichas partículas transportan energía electromagnética. Tratándose de energía electromagnética propagada a través del espacio y vibrando a una determinada frecuencia, ésta puede describirse a través de una función sinusoidal que describe el campo eléctrico;

$$E = E_0 e^{-i(kx - \omega t)} \quad (2.1)$$

$$E = E_0 \cos(kx - \omega t + \phi) + jE_0 \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (2.2)$$

Y a través de otra función sinusoidal transversal que describe el campo magnético;

$$H = H_0 e^{-i(kx - \omega t)} \quad (2.3)$$

$$H = H_0 \cos(kx - \omega t + \phi) + jH_0 \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (2.4)$$

Al multiplicador de la variable espacial x le vamos a llamar número de onda, y al multiplicador de la variable temporal t le vamos a llamar frecuencia angular. El número de onda y la frecuencia angular se relacionan con la longitud de onda y con la frecuencia de onda, respectivamente.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.5)$$

$$w = 2\pi f \quad (2.6)$$

De donde la relación entre la frecuencia y la longitud de onda da como resultado la velocidad de la luz en el medio. La velocidad de la luz en el vacío es de $3E8$ m/s.

$$c = \lambda f \quad (2.7)$$

Siendo el campo eléctrico y el campo magnético dos ondas transversales, la potencia transportada puede ser expresada como el producto cruz entre ambas. Dicha potencia es vectorial, y se denomina vector de Poynting;

$$\wp = E \times H \quad (2.8)$$

Y la magnitud del vector de Poynting, por tanto, está dada por:

$$|\wp| = \frac{E_o H_o}{u_o} = \frac{E_o^2}{2u_o c} \quad (2.9)$$

De donde u representa la permeabilidad magnética del medio de propagación de la luz y c la velocidad de la luz en dicho medio. Al pasar de un medio a otro, la luz conserva su energía. Para ello, la onda electromagnética no debe cambiar su frecuencia al pasar de un medio a otro. Sin embargo, diferentes medios presentan diferentes permisividades eléctricas, esto repercute en una variación de la velocidad de propagación de la onda. Si en la onda varía la velocidad de propagación y no su frecuencia, entonces el otro parámetro que varía es su longitud de onda, con lo cual se concluye que la relación entre la velocidad de propagación entre ambos medios equivale a la relación entre la longitud de onda en ambos medios.

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_o} = n_1 \quad (2.10)$$

Siendo λ_o la longitud de la onda en el vacío y n_1 el índice de refracción del medio. La relación de la velocidad de propagación de la onda en ambos medios estará dada por:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{\partial E_1}{\partial t}}{\frac{\partial E_2}{\partial t}} \quad (2.11)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{-w_1 E_1 \sin(k_1 x - w_1 t + \phi)}{-w_1 E_1 \sin(k_2 x - w_1 t + \phi)} = \frac{\sin(k_1 x - w_1 t + \phi)}{\sin(k_2 x - w_1 t + \phi)} \quad (2.12)$$

Y también puede obtenerse, teniendo en consideración la ecuación 2.10:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1 f}{\lambda_2 f} = \frac{\lambda_1 / \lambda_0}{\lambda_2 / \lambda_0} = \frac{n_1}{n_2} \quad (2.13)$$

Igualando las dos últimas ecuaciones:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin(k_1 x - w_1 t + \phi)}{\sin(k_2 x - w_1 t + \phi)} \quad (2.14)$$

En la relación anterior se puede hacer la sustitución de variables siguiente:

$$\theta_1 = k_1 x - w_1 t + \phi \quad (2.15)$$

$$\theta_2 = k_2 x - w_1 t + \phi \quad (2.16)$$

Teniendo como resultado la expresión siguiente, a la que se le llama Ley de Snell:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} \quad (2.17)$$

Cuando la luz pasa de un medio a otro medio con diferentes características ópticas, el ángulo en el cual se propaga la luz varía. A la relación matemática entre el cambio del ángulo de propagación de la luz y el índice de refracción de ambos medios se le denomina Ley de Snell, en un libro de física óptica puede hallarse cómo se deduce la Ley de Snell desde las ecuaciones de Maxwell [4]. A continuación, se muestra la Ley de Snell:

$$n_1 \text{ Sen } \theta_1 = n_2 \text{ Sen } \theta_2 \quad (2.18)$$

La Figura 2.2 muestra a la luz, bajo la aproximación de rayo de luz, propagándose de un medio cuyas características ópticas dan como resultado un índice de refracción n_1 , a otro medio cuyas características ópticas dan como resultado un índice de refracción n_2 . Siendo θ_1 y θ_2 el ángulo de incidencia de la luz sobre la frontera entre ambos medios y la perpendicular de dicha frontera horizontal.

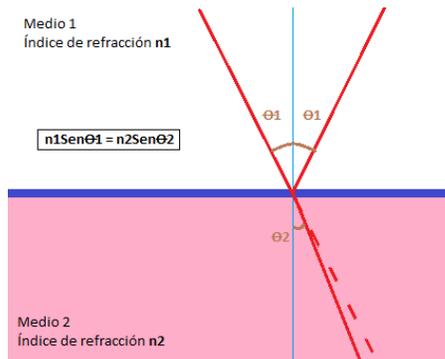


Figura 2.2: Representación gráfica de la Ley de Snell [5]

El índice de refracción $n=1$ denota un medio de propagación “transparente”, y ese es el valor que toma el vacío debido a que el índice de refracción de un medio de propagación siempre es medido en relación al vacío. En la ley de Snell enunciada, n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios de propagación de origen y destino respectivamente, y θ_1 y θ_2 son el ángulo que se produce entre la perpendicular entre el borde de ambos medios de propagación y la trayectoria que sigue la luz a través de éstos. El aire toma un valor de $n=1.0013$. A continuación, la Tabla 1 muestra los índices de refracción de distintos materiales.

MATERIAL	ÍNDICE DE REFRACCIÓN
Vacío	1
Acetona	1.36
Agua	1.33
Alcohol	1.329
Benceno	1.5
Vidrio	1.52
Cuarzo	1.544

Tabla 1: Índice de Refracción de Materiales [6]

En cuanto a la intensidad de la señal que se refleja, y la señal que se refracta, de un medio a otro diferente en cuanto a índice de refracción; las ecuaciones de Fresnel nos permiten calcular la intensidad de la señal reflejada y la señal

refractada hacia el otro medio. Al cociente entre la magnitud de la señal reflejada y la magnitud de la señal incidente le llamamos reflectancia (r). Al cociente entre la magnitud de la señal transmitida y la magnitud de la señal incidente le llamamos transmitancia (t). Las ecuaciones de fresnel se deducen de las ecuaciones de Maxwell y la Ley de Snell [7], y son las siguientes:

$$r_T = \frac{\text{Sen}(\theta_i - \theta_t)}{\text{Sen}(\theta_i + \theta_t)} \quad (2.19)$$

$$t_l = \frac{2 \cos \theta_i \cos \theta_t}{\text{Sen}(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)} \quad (2.20)$$

$$t_T = \frac{2 \text{Sen} \theta_i \cos \theta_t}{\text{Sen}(\theta_i + \theta_t)} \quad (2.21)$$

$$|r| = r^2 \quad (2.22)$$

$$|t| = t^2 \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} \quad (2.23)$$

$$|r| + |t| = 1 \quad (2.24)$$

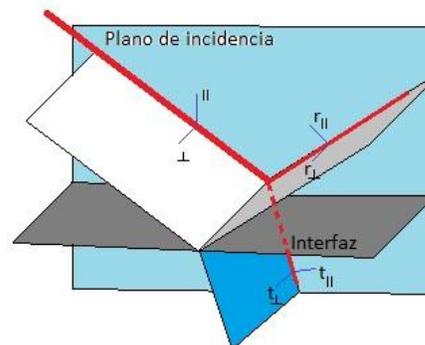


Figura 2.3: Representación gráfica de la reflectancia y la transmitancia [7]

De donde r_T , r_l , t_T , t_l , son las componentes paralelas y perpendiculares de la señal reflejada y la señal transmitida respectivamente, θ_i es el ángulo de incidencia en el medio y θ_t es el ángulo sobre el cual se transmite la luz en el otro medio [7]. La

Figura 2.3 muestra gráficamente la reflectancia y la transmitancia con sus componentes paralela y perpendicular. Teniendo como origen las condiciones de frontera del campo eléctrico y el campo magnético y la Ley de Snell. Es importante conocer la relación entre la longitud de onda y la frecuencia en una onda electromagnética en general, y de la luz en particular. Ésta viene dada por la siguiente relación:

$$c = \lambda f \quad (2.25)$$

Donde c es la velocidad de la luz en el vacío, $3E+08$ m/s, λ es la longitud de onda de la señal en metros, y f es la frecuencia de la señal en Hertz.

2.4 Estándares internacionales que intervienen en un sistema FSO

A continuación, se realiza una breve revisión del marco legal relevante a los sistemas FSO con el fin de determinar qué limitaciones legales existirían en la concepción de tal sistema. En el país no existe reglamentación específica para sistemas FSO, por lo cual se consultarían los documentos de los organismos rectores de las telecomunicaciones a nivel internacional. Entre estos organismos consta la International Organization for Standardization (ISO), en castellano la Organización Internacional de Estandarización; la Telecommunications Regulation Authority (TRA)(UAE), en castellano la Autoridad de Regulación de las Telecomunicaciones; y la International Electric and Electronic Engineering Society (IEEE), en castellano la Sociedad Internacional de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

2.4.1 Organización Internacional de Estandarización (ISO)

La regulación ITU relacionada a radiofrecuencias involucra bandas de hasta 3THz, lo que sería equivalente a longitudes de onda desde 100 μ m, lo que implica que el uso de frecuencias fuera de esta banda es de licencia libre. Esto brinda a los sistemas FSO una ventaja económica sobre los sistemas en radiofrecuencias. La recomendación ITU G.640 da recomendaciones acerca de las condiciones básicas y parámetros básicos de operación de un sistema FSO. Para este trabajo, es relevante la recomendación del ángulo de aceptación de un sistema FSO que viene

dado en el ángulo de desviación con respecto al centro del haz de luz en el cual la potencia adopta el valor de [8]:

$$P_r = \frac{1}{e^2} \quad (2.26)$$

2.4.2 Autoridad Regulatoria de las Telecomunicaciones (TRA) (UAE)

Esta institución, con sus siglas en inglés “Telecommunications Regulation Authority”, y con jurisdicción en oriente medio, somete a la implementación de los sistemas FSO a regulaciones concernientes a la salud humana con respecto a la exposición a los láseres (International Electrotechnical Commission Standard IEC 60825-12, productos láser parte 12). El descarrilamiento de un terminal FSO emisor puede provocar que la luz se irradie hacia el nivel del suelo. Por lo cual, para evitar que dicho accidente tenga consecuencias en la salud humana, o en la vida humana, es preciso o bien regular la intensidad de señal que puede emitir un terminal FSO o implementar en el terminal FSO un sistema de protección que lo apague una vez que dicho terminal se desvíe de su ángulo de irradiación. De acuerdo a esta legislación, un terminal FSO ha de contener láseres sólo de tipo 1, 1M, 2 o 2M [9].

2.4.3 Sociedad Internacional de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE)

IEEE es reconocida por sus siglas en inglés que dicen “International Electric and Electronic Engineering Society”. En IEEE se creó el estándar IEEE 802.15.7 para comunicaciones en el espectro de la luz visible. Este estándar soporta comunicaciones en espectro de la luz visible con altas tasas de datos desde los 96 Mbps mediante una rápida modulación de la luz que pueden atenuarse durante su operación. El estándar provee mecanismos adaptables a la atenuación para las bandas sin licenciar del espectro de la luz visible para comunicaciones a alta velocidad [10].

CAPÍTULO 3

3. MODELAMIENTO DEL MEDIO DE PROPAGACIÓN

En este capítulo se presentarán los modelos de matemáticos, y en caso de ser necesario estrategias para simularlos, de la señal que se propaga más las diferentes condiciones ambientales que afectarán la propagación de dicha señal, lo que incluye lluvia o humedad del ambiente, niebla, polvo y aerosoles, obstáculo sólido que ocasiona obstrucción parcial.

Las pérdidas geométricas se darán en función de la relación geométrica entre el haz de luz que se ensancha en función de la distancia recorrida y la proporción de dicho haz ensanchado que es receptada por el terminal FSO receptor, posteriormente en este capítulo dicha relación se analizará con más detalle. Las pérdidas ocasionadas por los elementos de la atmósfera y sus impurezas se dan en función de la Ley de Beer, que analiza la absorción de la luz ocasionada por diferentes soluciones líquidas o gaseosas. Esta absorción se da en relación al tamaño de las partículas del soluto, la concentración de la solución y las características espectrales de la sustancia, las que dependen de la longitud de onda de la luz [11].

La atmósfera, con sus efectos, es asumida como uniforme en todo el trayecto en las simulaciones de este trabajo, por lo cual será tomada en cuenta como un sistema lineal, en el que pueden superponerse las pérdidas ocasionadas por los gases atmosféricos sin impurezas, más las pérdidas ocasionadas por los gases de vapor de agua o neblina, más las pérdidas ocasionadas por gotas de agua presentes en el aire (lluvia), más las pérdidas ocasionadas por polvos aerosoles y otros contaminantes. Se han hecho implementaciones para medir el efecto de los gases atmosféricos en un sistema FSO, y estos muestran variaciones aleatorias en la atenuación atmosférica muy debajo del nivel DC de dicha atenuación [36], dado que el nivel DC es constante y por lo tanto no afectan la linealidad del sistema. Lo que se muestra en la ecuación siguiente, en la que α es el símbolo que denota atenuación en decibeles (dBm):

$$\alpha = \alpha_{aire-limpio} + \alpha_{lluvia} + \alpha_{niebla} + \alpha_{aerosoles} \quad (3.1)$$

3.1 Ley de Beer

La Ley de Beer-Lambert es una ley física que relaciona la atenuación de la luz con las propiedades del material sobre el cual viaja la luz. Indica la cantidad de luz absorbida por una sustancia disuelta es directamente proporcional a la concentración de dicha sustancia (c), a la longitud del trayecto de la luz a través de dicha sustancia (R) y a una constante de absorción molar (a) [11].

$$A = aRc \quad (3.2)$$

3.2 Modelos atmosféricos

En nuestro escenario, la luz atravesando el aire, la solución son los gases de la atmósfera, la concentración se traduce en el coeficiente de atenuación atmosférico en el aire sin impurezas $\alpha = 0.4$ dB/km, la distancia R en kilómetros que viaja la luz a través del aire, y T la transmitancia del medio de propagación.

$$T = 10^{-\alpha R} \quad (3.3)$$

3.2.1 Aire Limpio

En aire limpio la atenuación del medio está dada por la ecuación mostrada anteriormente y el valor del coeficiente de atenuación es $\alpha = 0.4$ dB/km. [12]. Se muestra, en la Figura 3.1, la función descrita últimamente representada en un bloque con sus parámetros de entrada y salida:

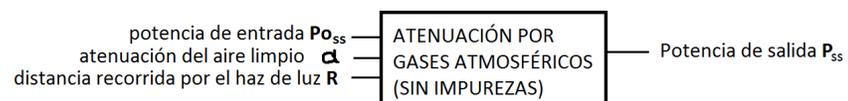


Figura 3.1: Parámetros de entrada y salida para la atenuación atmosférica

3.2.2 Niebla

La niebla es un medio más complejo y más rugoso que el aire puro. Sin embargo, se ha realizado el modelamiento a partir de la Ley de Koschmieder, con un factor de ajuste para longitud de onda:

$$L = \exp\left(-\frac{3.91}{V}\right)\left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q} R$$

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{si } V \geq 50 \text{ km} \\ 1.3 & \text{si } 6 \leq V < 50 \text{ km} \\ 0.16 + 0.34V & \text{si } 1 \leq V < 6 \text{ km} \\ V - 0.5 & \text{si } 0.5 \leq V < 1 \text{ km} \\ 0 & \text{si } V < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (3.4)$$

Donde λ es la longitud de onda de la luz propagada y V es la visibilidad de la niebla medida en kilómetros, q es un factor de difusión que deriva de las propiedades del material en este caso la niebla y L es la atenuación ocasionada por la niebla en dB/km [13]. A esta ecuación corresponde la atenuación en la niebla, la cual es dependiente de la longitud de onda de la luz. La función mostrada es una expresión de la Ley de Beer para un medio, como la niebla, cuya opacidad varía en función de la longitud de onda de la luz. Se muestra, en la Figura 3.2, la función descrita últimamente representada en un bloque con sus parámetros de entrada y salida.

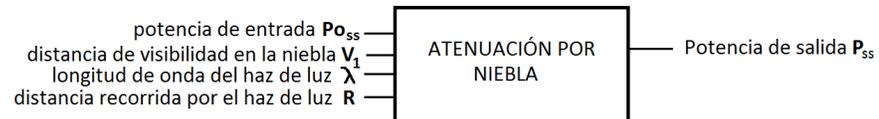


Figura 3.2: Parámetros de entrada y salida para la atenuación por niebla

3.3 Modelamiento del haz de luz

El haz de luz emitido por un emisor en un sistema FSO, tanto láseres como LEDs, describen la mayoría un haz de luz gaussiano. Esto es, un haz monocromático cuyos perfiles de irradiación son descritos por la función gaussiana.

$$P = P_0 e^{-\frac{(x-u)^2}{\sigma^2}} \quad (3.5)$$

En la que, u es la media de la función. En nuestro escenario u sería la ubicación del centro del haz gaussiano, P_0 es la amplitud de la señal en mW, x es la coordenada espacial y σ^2 es la varianza de la señal, en nuestro escenario es el ancho del haz en el cual la potencia es superior a su valor RMS y P la potencia del haz gaussiano en mW en cada coordenada espacial x [14].

Dado que la señal es emitida por un diodo LED o láser, ésta es emitida en torno a un ángulo de apertura, del cual puede calcularse la apertura numérica de la señal en cuestión. De esta forma, aun teniendo terminales FSO idénticos por el lado del emisor y por el lado del receptor, el receptor capturaría una fracción del haz de luz debido a que éste se ensanchará a medida que se propaga. El trabajo de J. Schuster, H. Willebrand, S. Bloom, E. Korevaar [38] menciona la relación entre la potencia irradiada a la distancia entre el emisor y el receptor del sistema FSO, y la señal que efectivamente el detector detecta. Dicha relación, en la que también está añadida la atenuación atmosférica, es;

$$P_r = P_t \frac{d_r^2}{(d_t^2 + DR)^2} 10^{-\alpha \frac{R}{10}} \quad (3.6)$$

En la que d_t es la apertura numérica del transmisor, d_r es la apertura numérica del receptor, D es la divergencia del haz de luz dado por las características del diodo LED o láser, R es la distancia entre el emisor y el receptor y α es la atenuación atmosférica. Entiéndase la divergencia D como la razón de cambio del ancho del haz gaussiano con respecto a la distancia recorrida [38]. El perfil del haz gaussiano emitido por el láser se ilustra en la Figura 3.3.

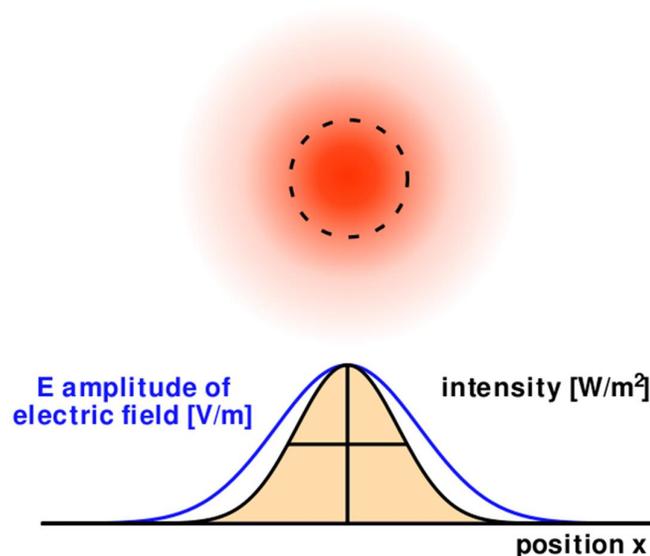


Figura 3.3: Perfil de un láser gaussiano [14] [15]

Se muestra, en la Figura 3.4, la función descrita últimamente representada en un bloque con sus parámetros de entrada y salida:

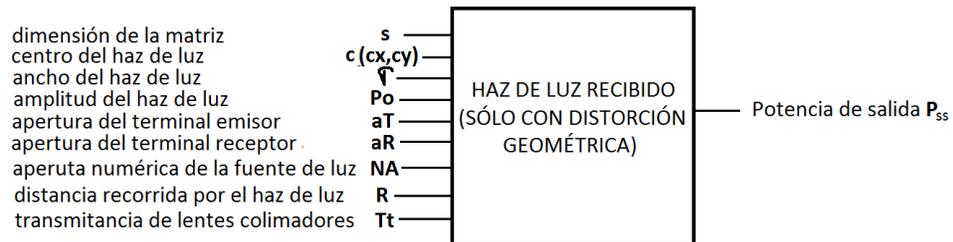


Figura 3.4: Parámetros de entrada y salida para el haz recibido con pérdidas geométricas

3.4 Modelamiento de la lluvia

La lluvia es un sistema disperso compuesto de varias gotas de agua distanciadas entre sí; para simplicidad, la lluvia será tratada como una sustancia, por lo cual respondería a la Ley de Beer. La ITU nos provee una relación para determinar la atenuación de la señal debido a la lluvia:

$$L = 0.509 R^{0.63} ; R < 3,8 \text{ mm/h} \quad (3.7)$$

$$L = 0.319 R^{0.63} ; 3,8 \text{ mm/h} \leq R \leq 7,6 \text{ mm/h} \quad (3.8)$$

$$L = 0.365 R^{0.63} ; R > 7,6 \text{ mm/h} \quad (3.9)$$

En las tres ecuaciones, L es la atenuación de la luz en dB y R es la precipitación medida en mm/h de lluvia [13]. Se muestra, en la Figura 3.5, la función descrita últimamente representada en un bloque con sus parámetros de entrada y salida:

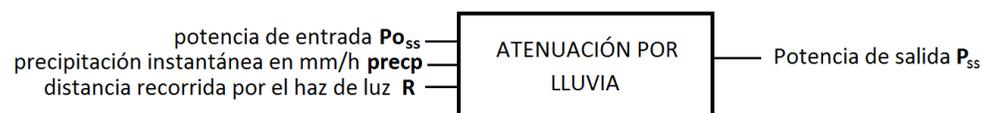


Figura 3.5: Parámetros de entrada y salida para la atenuación por lluvia

3.5 Modelamiento de aerosoles

Los aerosoles también un sistema disperso compuesto de varias gotas de agua distanciadas entre sí. Como aerosoles se incluyen el polvo, aerosoles propiamente dicho y smog. Para simplicidad, el aerosol será tratado como una sustancia, por lo cual respondería a la Ley de Beer. Un trabajo reciente de J. Jassim y A. Kodeary [17] halla por métodos de regresión no lineal la atenuación de la señal debido a los aerosoles:

$$t_s = \exp\left(-\frac{3.91}{V}\right)\left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q} R \quad (3.10)$$

Donde t_s es la transmitancia, adimensional, resultante del polvo o los aerosoles; V es la visibilidad del ambiente, λ es la longitud de onda de la luz que se propaga, R es la distancia que viaja la luz y q es una constante que representa el tamaño de la distribución de partículas [17]. La función mostrada es una expresión de la Ley de Beer para medios, como el polvo y los aerosoles, cuya opacidad varía en función de la longitud de onda de la luz. Se muestra, en la Figura 3.6, la función descrita últimamente representada en un bloque con sus parámetros de entrada y salida:

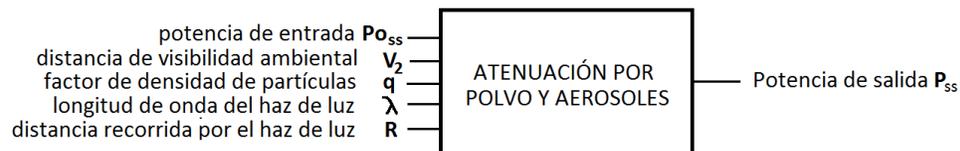


Figura 3.6: Parámetros de entrada y salida para la atenuación por polvo y aerosoles

En base a mediciones de visibilidad atmosférica realizadas en diferentes localidades de Brasil [37], un país tropical cuyas ciudades costeras cuentan con un clima similar a Guayaquil, se empleará para este trabajo un valor de visibilidad atmosférica de 10 kilómetros.

3.6 Modelamiento de obstáculo sólido

Un obstáculo sólido será modelado de tal forma que ocasione una obstrucción parcial a la señal. Por tratarse de una señal electromagnética que viaja de punto a punto a través del espacio libre, el concepto de zonas de Fresnel se aplicaría. A continuación, se muestra la fórmula general para hallar el radio de cada zona de Fresnel.

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (3.11)$$

En ella, r es el radio de la n – ésima zona de Fresnel, n es el orden de la zona de Fresnel sobre la cual se desea calcular el radio, d_1 es la distancia entre el punto de interés y el emisor, d_2 es la distancia entre el punto de interés y el receptor, y λ es la longitud de onda de la señal que se propaga [18]. En luz visible y NIR, consideraríamos despreciable la difracción por obstáculos. El obstáculo, entonces, será simulado mediante una matriz que represente la obstrucción por parte del obstáculo a la línea de vista entre el emisor y el receptor óptico. Se muestra, en la Figura 3.7, la función de obstaculización representada en un bloque con sus parámetros de entrada y salida:

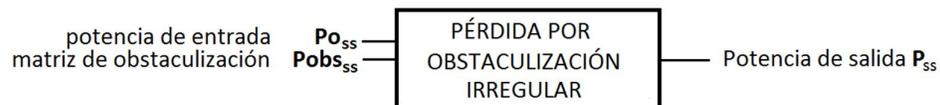


Figura 3.7: Parámetros de entrada y salida para las pérdidas por obstaculización irregular

Un obstáculo plano y horizontal no requeriría de una matriz para simularse, por lo cual éste será entendido en función del porcentaje de obstaculización de la zona de Fresnel de la luz viajera. Se muestra, en la Figura 3.8, la función de obstaculización representada en un bloque con sus parámetros de entrada y salida:

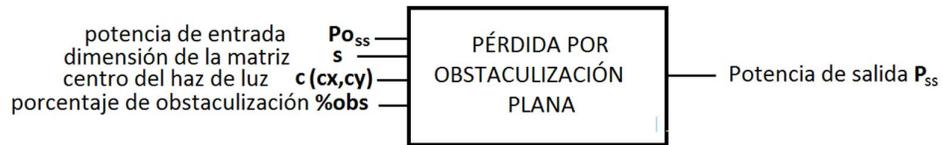


Figura 3.8: Parámetros de entrada y salida para las pérdidas por obstaculización plana horizontal

3.7 Efectos de difusión: disco de Airy

Cuando la luz atraviesa una abertura circular, ésta se difracta debido a su naturaleza ondulatoria, produciéndose un patrón de regiones iluminadas y oscuras que se suceden entre sí. La región central será la más iluminada, mientras las regiones a medida que se alejan del centro se iluminan menos [19]. Cuando modelamos bajo resoluciones bastante grandes, este patrón descrito se produce para las longitudes de onda de operación de un sistema FSO y sería prudente incluirla en nuestro modelo. Medido a partir del centro del haz, el patrón de iluminación cumple con la siguiente relación:

$$\text{Sen}\theta = 1.22 \frac{\lambda}{d} \quad (3.12)$$

Donde θ es el ángulo de apertura entre el centro del haz y cada punto del plano iluminado, λ es la longitud de onda del haz de luz y d es la distancia entre la abertura circular y el plano iluminado [19].

3.8 Adaptación de los modelos atmosféricos al ambiente de Guayaquil, Ecuador

Siguiendo el diagrama de bloques presentado en la figura 1.1 y siguiendo los modelamientos presentados a lo largo de este capítulo, se efectuará la simulación paso a paso de la parte del sistema que corresponde a la propagación de la señal. Algunas variables dependen de los dispositivos de entrada y salida que se utilizarán, de la resolución de la simulación, y también de las condiciones ambientales del escenario en el que se planteará la simulación. En el caso de la ciudad de Guayaquil, se toma de INHAMI la precipitación anual promedio teniéndose en cuenta que en un día promedio no hay lluvia intensa en la ciudad [20], quedando como datos los de la Tabla 2 mostrada a continuación.

PARÁMETRO	VALOR ESTIMADO EN ESCENARIO GUAYAQUIL
Distancia (R)	0.8 km
Visibilidad por niebla	1 km
Visibilidad por aerosoles	10 km
Precipitación	0.2 mm/h
Atenuación atmosférica del aire sin impurezas	0.4 dB/km

Tabla 2: Parámetros ambientales en el escenario ciudad de Guayaquil

CAPÍTULO 4

4. DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

En este capítulo se presentarán los modelos de matemáticos, y en caso de ser necesario estrategias para simularlos, de la señal que se propaga más las diferentes condiciones ambientales que afectarán la propagación de dicha señal, lo que incluye lluvia o humedad del ambiente, niebla, polvo y aerosoles, obstáculo sólido que ocasiona obstrucción parcial.

4.1 Descripción técnica de los terminales FSO

Sin entrar en detalles en cuanto a la arquitectura de los terminales FSO, se puede definir que éstos operan sobre una base estática y con la línea de vista entre emisor y receptor bien calibrada. El terminal de emisión consiste en un circuito que genera pulsos de voltaje y los convierte en luz apta para propagarse a través del aire. El terminal de recepción consiste en un fotorreceptor que capta dicha luz y los convierte en señales de voltaje que pueden ser leídas por un sistema digital.

4.1.1 Módulo de emisión

El terminal FSO de emisión consta de una fuente de luz, preferentemente un diodo láser o un diodo LED, la cual es alimentada por un circuito que genera pulsos de voltaje. En esta simulación, el circuito generará una señal impulsiva discreta de voltaje. En base a los gráficos proporcionados en las hojas de datos de distintos emisores de luz comerciales, se van calculando los parámetros faltantes. La apertura numérica, de no especificarse, se calcula a través del ángulo de apertura de la fuente para cuando la potencia adquiere el valor de receptividad acorde a la norma ITU G.649 [8] que corresponde con la ecuación 2.9. En la Tabla 3 se muestran diferentes fuentes de luz útiles para un sistema FSO con sus características más relevantes.

FUENTE	CORRIENTE MINIMA	POTENCIA DE DISPARO	APERTURA NUMÉRICA	λ (nm)
HL6545MG	50 mA	120 mW	0.13	660
L850P010	40 mA	10 mW	0.21	850
L1550P5DFB	13 mA	5 mW	0.139	1550
LED1550E	10 μ A	2 mW	0.57	1550

Tabla 3: Parámetros de operación de diodos láser y LED en la banda de operación de los sistemas FSO. [21-24]

El circuito de emisión consistirá en una fuente de voltaje discreta de 10 Vcc LM317, conectada a un juego de resistores y capacitores que proporcionarán las condiciones de operación de la fuente de luz y lo protegerán de cambios bruscos de voltaje. Dicho circuito se ilustra en la Figura 4.1 mostrada a continuación.

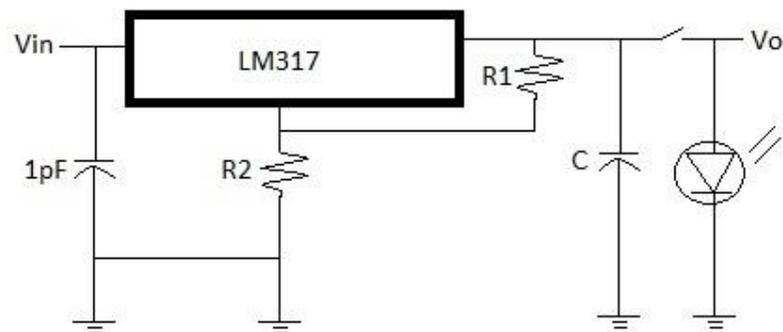


Figura 4.1: Circuito del terminal FSO emisor

La señal de salida del circuito de disparo vendrá dada por la siguiente relación:

$$V_o = 1.25 \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = 10 \quad (4.1)$$

Cuando la fuente LM317 deja de emitir voltaje, los capacitores entran en fase de descarga desvaneciéndose exponencialmente la señal, en la que R es la resistencia equivalente.

$$V_{DC} = 5 e^{-t/RC} \quad (4.2)$$

$$R = R_1 + R_2 \quad (4.3)$$

En base a estas ecuaciones, se calcula que para un diodo láser HL65465MG [21], para que pueda operar a 120 mW, se han de emplear resistencias $R_1 = 12$ ohms y $R_2 = 84$ ohms, se obtiene un voltaje de umbral de 2 V. Para una entrada de impulso discreto de 10 V se obtiene un tiempo de descarga, hasta el valor de umbral, de 0,705 ns. El inverso de este tiempo, multiplicado por la velocidad de la luz, nos da el ancho de banda del pulso emitido es 1.418 GHz. En cambio, al calcular el ancho de banda de las longitudes de onda operativas para sistemas FSO, obtenemos una frecuencia de 400 Thz para la longitud de onda de 0.75 μm , y una frecuencia de 193.55 Thz para la longitud de onda de 1.55 μm . Por consiguiente, el pulso emitido puede ser la envolvente de la señal, a cualquiera de las frecuencias de operación de FSO, y bajo una modulación OOK. Se empleará la ecuación 2.8 para hallar el ancho del pulso emitido, se calcula el valor de 0.2115 metros. Entonces la respuesta a impulso del terminal FSO emisor, en términos de potencia total emitida, viene dado por un pulso de 0.2115 metros que envuelve a una onda de longitud de 1.55 μm . El gráfico de dicha respuesta a impulso se muestra en la Figura 4.2.

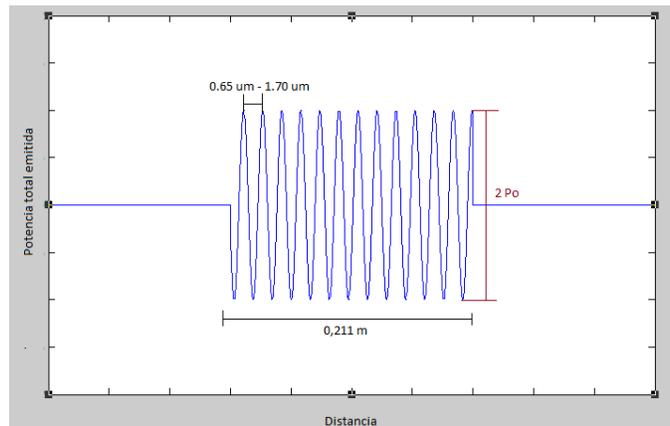


Figura 4.2: Respuesta impulsiva del terminal FSO emisor

4.1.1 Módulo de recepción

El terminal FSO de recepción consta de un fotorreceptor, el cual es sucedido por un circuito que capta la potencia entrante, la convierte en voltaje e ingresa a un sistema digital que capta el voltaje entrante como '1' y '0' lógicos de acuerdo al nivel de señal. En esta simulación, el circuito de emisión generará una señal impulsiva discreta de voltaje. En base a los gráficos proporcionados en las hojas de datos de distintos fotorreceptores comerciales, se van calculando los parámetros faltantes. En la Tabla 4 se muestran diferentes receptores de luz útiles para un sistema FSO con sus características más relevantes.

DETECTOR	CORRIENTE	ÁREA ACTIVA	SENSITIVIDAD MÁXIMA	Λ (nm)
S3883	1.4 Ua	1.5 mm	0.6 A/W a 850 nm	350- 1000
L850P010	100 Ua	0.4 mm	0.9 A/W a 1550 nm	950- 1700

Tabla 4: Parámetros de operación de fotorreceptores en la banda de operación de los sistemas FSO. [25][26]

El circuito de detección consistirá en un divisor de voltaje compuesto por una fuente V_{cc} , el fotorreceptor y una resistencia de carga ajustable para obtener el nivel voltaje deseado a la salida. En la Figura 4.3 se muestra un circuito fotorreceptor típico,

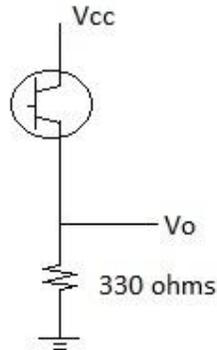


Figura 4.3: Circuito del terminal FSO receptor

En función de las corrientes de umbral de las tablas de datos y la resistencia del circuito se obtiene una potencia de umbral de 3.3 μW para L850P010 y 0.647 nW para S3883. En decibelios, estos valores son -57.14 dB y -142.5 dB respectivamente.

4.2 Lentes colimadores

Lentes colimadores se les llaman a los lentes que llevan rayos paralelos hacia un punto singular. Estos adoptan la forma de un lente elíptico. La colimación apropiada de una fuente láser puede ser verificada con un interferómetro de cizalladura [27], tal como se ilustra en la Figura 4.4 a continuación:

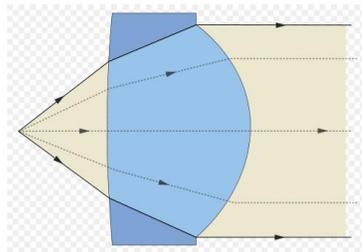


Figura 4.4: Ilustración de un lente colimador [28]

Pueden emplearse lentes colimadores ópticos para reducir el ángulo de apertura que sale del terminal FSO emisor, teniendo como resultado, que el terminal FSO receptor capture un mayor porcentaje de la señal emitida. En un caso ideal, con lentes colimadores a la medida justa, las pérdidas geométricas del sistema pueden anularse por completo, como se representa en la Figura 4.5, quedando sólo las pérdidas debido a la transmitancia de los lentes colimadores del sistema.



Figura 4.5: Esquema ilustrado de un enlace FSO con lentes colimadores [27]

Los detalles del diseño de un lente colimador, no forman parte de este trabajo. El objetivo de este subcapítulo es más bien el de remarcar la utilidad de los lentes colimadores para corregir el ángulo de apertura del terminal FSO emisor y enfocar toda la potencia transmitida hacia el terminal FSO receptor. En cuanto a la distancia entre el lente y el terminal FSO, el terminal FSO debe estar ubicado en el foco del lente, y la solución deriva de la ecuación característica de los lentes, y viene dada por la siguiente relación [27]:

$$f = \frac{l}{\tan \theta/2} \quad (4.4)$$

En la que, l es el radio del lente colimador, θ es el ángulo en el que la fuente de luz emite el haz de luz y f es la distancia entre el lente colimador y su foco. Para $l = 80$ mm y para las fuentes de luz mostradas en la Tabla 3, estos son los valores calculados de f que se mostrarán en la Tabla 5:

FUENTE	APERTURA NUMÉRICA	DISTANCIA FOCAL
HL6545MG	0.13	612.8 mm
L850P010	0.21	376.1 mm
L1550P5DFB	0.139	572.7 mm
LED1550E	0.57	127.8 mm

Tabla 5: Distancias focales calculada entre lentes colimadores de 80mm de radio y las fuentes de luz seleccionadas [21-24]

4.3 Esquema del algoritmo a desarrollar

El primer paso de la simulación es generar el haz de luz gaussiano, el cual se lo mostrará en un plano transversal al frente de transmisión del haz de luz. Dicho plano transversal se lo mostrará en una matriz cuadrada con una cantidad impar s de cuadrículas, cada una de ellas tendrá en mW. el valor de potencia irradiado que le corresponde a su ubicación. La Figura 4.6 muestra, en diferentes tonos de rojo, la intensidad de la luz en un corte transversal del haz gaussiano.

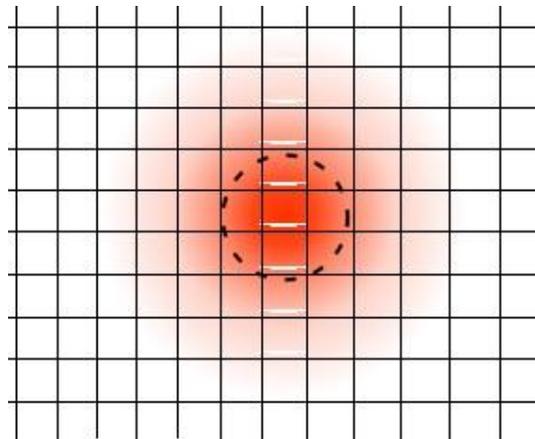


Figura 4.6: Cuadrículas que representan ubicaciones en el plano transversal al frente del haz de luz [15]

Los parámetros de entrada serán la longitud de onda de la luz, la amplitud de la potencia de la señal irradiada P_0 , la apertura del terminal FSO emisor, la apertura del terminal FSO receptor, la divergencia del haz de luz D y la distancia a

propagarse R. Los parámetros de calibración serían la cantidad s de cuadrículas de la matriz, el ancho del haz gaussiano (sigma), los parámetros l y m que ajustan la matriz de irradiación hacia el área de irradiación según la norma ITU G.645 [8] y el par ordenado c correspondiente al centro de la matriz de irradiación.

$$c = \frac{\text{size}(M)+1}{2} \quad (4.5)$$

$$\sigma = \frac{\text{size}(M)-1}{2\sqrt{2}} \quad (4.6)$$

$$l = \text{apertura}1 \frac{\text{size}(M)}{\sqrt{2}} \quad (4.7)$$

$$m = R * \text{Tan}\left(\frac{D}{2}\right) \quad (4.8)$$

Se generará una matriz M de ceros de tamaño s, la cual junto al centro c y a σ serán los parámetros de entrada de la función que generará el haz de luz gaussiano. Con una potencia de $P_o = 5 \text{ mW}$, $\sigma = 1$ y una matriz de 9x9, cuya dimensión se justificará al inicio del capítulo siguiente, se simula la potencia de irradiación, dando el siguiente resultado numérico mostrado en la Figura 4.7 y la respectiva gráfica mostrada en la Figura 4.8:

Pt =

1.0e-03 *

0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0003	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0001	0.0012	0.0053	0.0088	0.0053	0.0012	0.0001	0.0000
0.0000	0.0012	0.0144	0.0647	0.1066	0.0647	0.0144	0.0012	0.0000
0.0002	0.0053	0.0647	0.2899	0.4780	0.2899	0.0647	0.0053	0.0002
0.0003	0.0088	0.1066	0.4780	0.7880	0.4780	0.1066	0.0088	0.0003
0.0002	0.0053	0.0647	0.2899	0.4780	0.2899	0.0647	0.0053	0.0002
0.0000	0.0012	0.0144	0.0647	0.1066	0.0647	0.0144	0.0012	0.0000
0.0000	0.0001	0.0012	0.0053	0.0088	0.0053	0.0012	0.0001	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0003	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000

Figura 4.7: Valores por celda de la potencia emitida

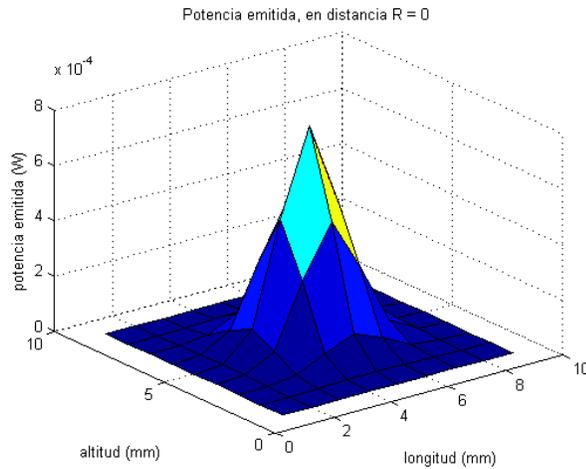


Figura 4.8: Gráfico 3D de la potencia emitida

Se emite una potencia de 7,97 dBm, y a una potencia pico de -0.011 dBm. A continuación, se genera la señal que llega al terminal FSO de recepción, que se abordará durante el siguiente capítulo. El programa preguntará al usuario si en el escenario de la simulación están presentes la niebla, la lluvia, obstáculos, polvo o aerosoles. Simulará tales efectos en el orden mencionado. Y finalmente mostrará una matriz con los valores de potencia recibida en decibeles. Lo que se resume en la Figura 4.9 que ilustra el diagrama de bloques:

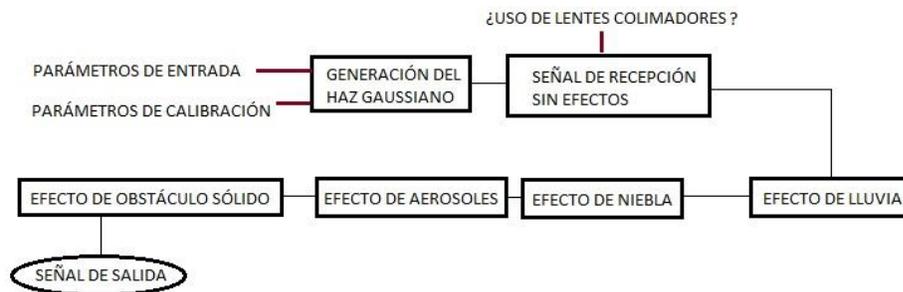


Figura 4.9: Diagrama de bloques general de la simulación

Los parámetros de entrada para las condiciones atmosféricas serán 'alfa' para la atenuación atmosférica, visibilidad_niebla para la distancia de visibilidad en la niebla en metros, visibilidad_aerosoles para la distancia de visibilidad ocasionada por la presencia de polvo o aerosoles en el aire en kilómetros, y P_{obs} una matriz

del mismo tamaño de la matriz de irradiación con valores entre '1' y '0' que representan las cuadrículas que están completamente despejadas, o en su defecto transparentes, o completamente obstaculizadas respectivamente.

CAPÍTULO 5

5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

La prueba de la simulación se la realizará bajo el escenario que contempla el uso del diodo láser L1550P5DFB [23] (ver Tabla 3) como fuente de luz, empleándose lentes colimadores, recorriéndose una distancia de 800 metros, empleando el fotorreceptor L850P010 [26] (ver Tabla 4) y bajo condiciones atmosféricas análogas a la ciudad de Guayaquil. Se procuraría tener una cantidad de puntos espaciales s a simularse lo suficientemente grande para tener precisión en los resultados y lo suficientemente pequeña para que el algoritmo se ejecute con una rapidez aceptable y también para evitar la necesidad de simular los efectos a nivel molecular. Con el fin de seleccionar un valor s adecuado, se simula la potencia del haz emitido por el terminal FSO de emisión para diferentes valores de s , lo que se muestra en la Tabla 6.

S	POTENCIA DE ENTRADA (mW)
1	0.7880
3	3.8595
6	4.9338
9	4.9513
12	4.9514
15	4.9514

Tabla 6: Potencia de entrada para diferentes números de cuadrículas

Puede observarse una convergencia del valor de la potencia de entrada a medida que se incrementan el número de cuadrículas simulado de la señal. En el valor de 9 cuadrículas se observa la convergencia del tercer número decimal del valor, por lo cual se escogerá el valor de S , el parámetro que determina el número de cuadrículas espaciales a simularse, de 9.

Los valores de los parámetros de la simulación se muestran en la Tabla 7.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
S	9	Cuadrículas
σ	1	
Po	5	mW
Λ	1.55	μm
Apertura emisor	0.8	cm
Apertura receptor	0.8	cm
Ángulo de apertura del emisor	8	$^{\circ}$
Transmitancia lentes colimadores	0.9	
Distancia	0.8	Km
A	0.4	dB/km
Precipitación (clima seco)	0.2	mm/h
Precipitación (clima lluvioso)	100	mm/h
Visibilidad niebla	1	Km
Visibilidad aerosoles	10	Km
% obstrucción	1	%

Tabla 7: Parámetros para la simulación en escenario ciudad de Guayaquil

De esta manera, en el escenario ciudad de Guayaquil, el plano transversal al frente de onda tiene 8 mm de lado, con 9 x 9 cuadrículas, cada una con 8/9 mm de lado.

5.1 Simulación de la respuesta impulso del sistema con aire despejado

Empleándose la ecuación 3.4, con los parámetros descritos en el Capítulo 3:

$$P_r = P_t \frac{d_r^2}{(d_t^2 + DR)^2} 10^{-a \frac{R}{10}} \quad (5.1)$$

Se revisa, a continuación, cómo varía la potencia recibida en función de la distancia recorrida R , sin lentes colimadores y luego con lentes colimadores. Para este propósito se bosquejará un gráfico P_r contra R , mostrado en la Figura 5.1.

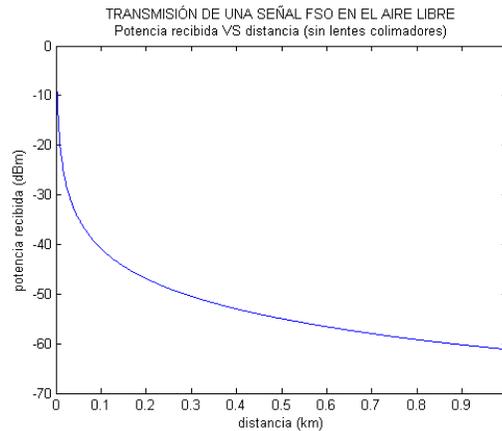


Figura 5.1: Gráfico potencia recibida vs. distancia para distancias de hasta 1 km sin lentes colimadores

Del segundo gráfico se puede observar que se alcanza la potencia de umbral del receptor a la distancia de 0,029 kilómetros. Ahora, se implementarán lentes colimadores al modelo. Se obtiene la siguiente relación entre potencia recibida y distancia, mostrada en la Figura 5.2 hasta 1 km, y en la Figura 5.3 hasta 100 km.

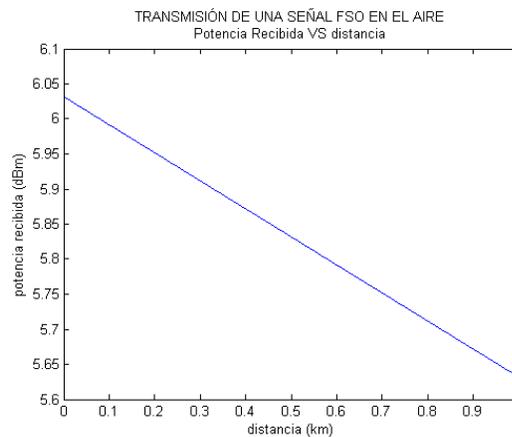


Figura 5.2: Gráfico potencia recibida vs. distancia para distancias de hasta 1 km con lentes colimadores

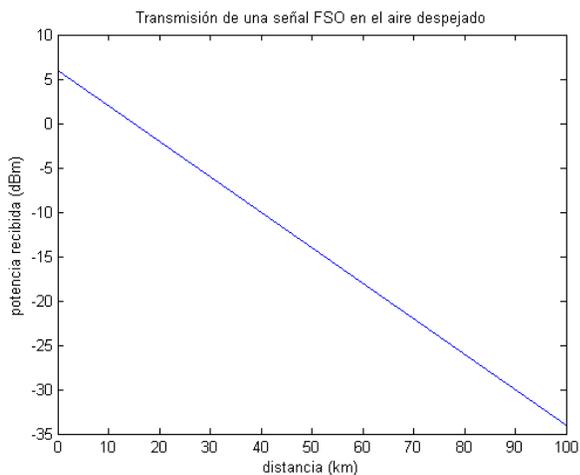


Figura 5.3: Gráfico potencia recibida vs. distancia para distancias de hasta 100 km con lentes colimadores

5.1.1. Resultados numéricos

Se simula el sistema, bajo el escenario ciudad de Guayaquil, para mostrar resultados sin lentes colimadores y con lentes colimadores en la Tabla 8.

LENTES COLIMADORES	PARÁMETRO	VALOR EN dBm	Pérdida
NO	Potencia pico	-178,88	
NO	Potencia recibida total	6,17	-0,78
NO	Potencia recibida en el terminal receptor	-58,60	-65,55
SÍ	Potencia pico	-5,23	
SÍ	Potencia recibida total	5,71	-1,24

Tabla 8: Tabla de resultados tras simular en aire despejado

5.1.2 Gráfico de respuesta en frecuencia

En cuanto ni el efecto de la atmósfera, ni la apertura del haz luminoso, afectan al haz de luz emitido con respecto a las frecuencias de operación de los sistemas FSO; el sistema, en aire despejado, no variará con

respecto a la frecuencia. Entonces, no será necesario realizar un gráfico de respuesta de frecuencia para mostrar esto.

5.1.3 Gráfico de respuesta espacial

Se ejecuta nuevamente el programa principal, bajo los parámetros del escenario ciudad de Guayaquil, sin lentes colimadores y sin efectos atmosféricos con el fin de observar la gráfica que se obtiene en la Figura 5.4.

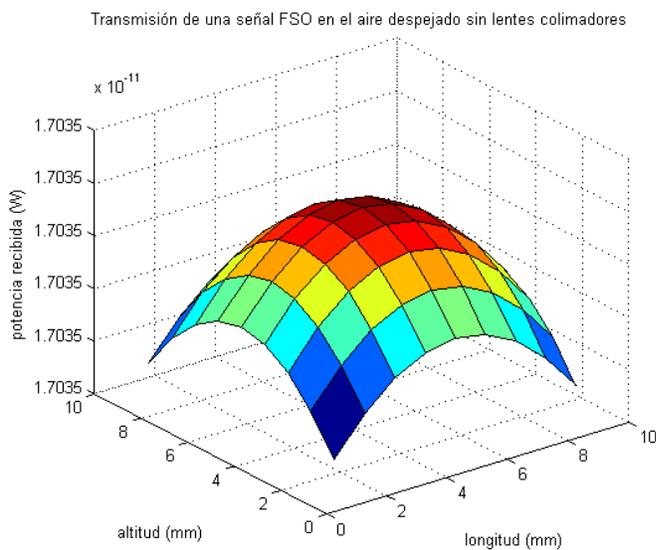


Figura 5.4: Gráfico potencia recibida (W) contra el plano irradiado a 0,8 km del emisor, sin lentes colimadores

A continuación, se activa la opción de emplear los lentes colimadores y se vuelve a ejecutar la simulación, obteniendo el gráfico mostrado en la Figura 5.5.

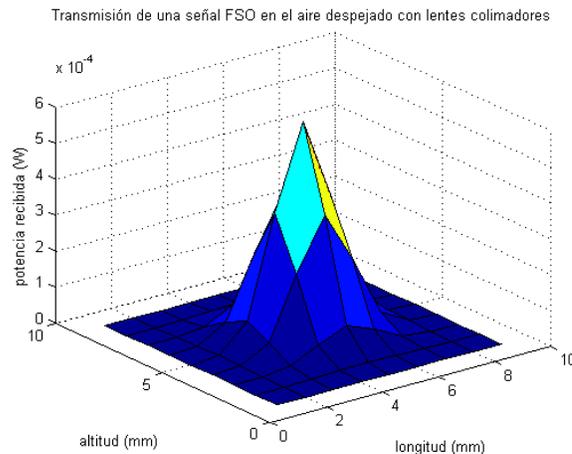


Figura 5.5: Gráfico potencia recibida (W) contra el plano irradiado a 0,8 km del emisor, con lentes colimadores

5.1.4 Análisis de resultados

Teóricamente, al ser la atenuación atmosférica de 0,4 dB/km, ésta causa una atenuación de 0,32 dBm a una señal de 0,8 km. Sin embargo, los lentes colimadores no son cristales perfectos, éstos absorben una pequeña fracción de la luz, lo cual se ve reflejado en la transmitancia de los lentes. Esto significa que las pérdidas con lentes colimadores van a ser mayores a dicho valor teórico. De hecho, al realizarse la simulación en el aire libre, se constata que se perdió -1,24 dBm de potencia.

Del segundo gráfico de potencia recibida contra distancia, la Figura 5.3, se puede observar que se alcanza la potencia de umbral del receptor a la distancia de 88 kilómetros. De esta gráfica y de la gráfica de potencia recibida contra distancia sin lentes colimadores, la Figura 5.2, y en la que se alcanza la potencia de umbral a 0,029 km, puede sostenerse que el uso de lentes colimadores contribuye a aumentar la distancia utilizable del sistema de una manera bastante significativa.

Se observa en la tabla de resultados de la simulación, la Tabla 8, que es significativa la diferencia entre usar y no usar lentes colimadores para corregir la apertura del haz emitido, mientras tanto no es mucha la contribución de la atmósfera como tal para reducir la potencia recibida.

Comparando las gráficas dadas por la Figura 5.4 y la Figura 5.5 se observa que, mientras no es notorio el cambio de la forma de la señal al usar lentes colimadores, sí lo es la magnitud de la señal recibida que varía en un orden de 500.

5.2 Simulación de la respuesta impulso del sistema con niebla

Empleándose la ecuación 3.4, con los parámetros descritos durante el capítulo 3:

$$L = \exp\left(\frac{-3.91}{V}\right)\left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q} R$$

$$q = \begin{cases} 1.6 & \text{si } V \geq 50 \text{ km} \\ 1.3 & \text{si } 6 \leq V < 50 \text{ km} \\ 0.16 + 0.34V & \text{si } 1 \leq V < 6 \text{ km} \\ V - 0.5 & \text{si } 0.5 \leq V < 1 \text{ km} \\ 0 & \text{si } V < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (5.2)$$

Se modela el efecto de la niebla sobre la señal propagada. Hay que notar que el parámetro de salida L está dado en decibeles, por lo cual hay que convertirlo a su equivalente en transmitancia de la niebla, empleando el logaritmo inverso,

$$T_n = 10^{-L/10} \quad (5.3)$$

Se revisa, a continuación, cómo varía la potencia recibida en función de la distancia recorrida R . Para este propósito se bosquejará un gráfico P_r contra R en MATLAB, mostrado en la Figura 5.6.

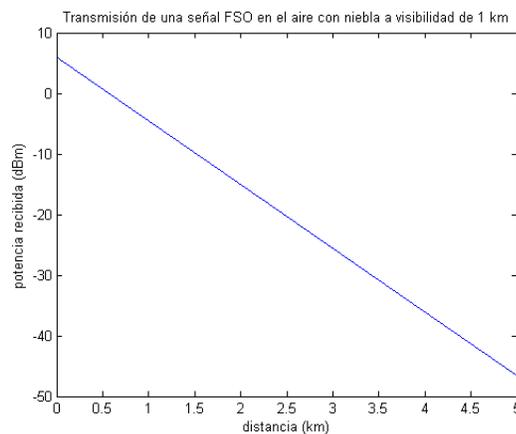


Figura 5.6: Gráfico potencia recibida vs. distancia con niebla para distancias de hasta 5 km

Seguendo el gráfico, a aproximadamente 3,425 km se alcanzará la potencia de umbral de -30 dBm. Ahora se bosquejará otro gráfico, mostrado en la Figura 5.7, para observar el comportamiento del sistema al variar la visibilidad de la niebla. Se mantiene constante la distancia a 0,8 km, y se grafica a partir de $V = 0,1$ dado que a $V = 0$ la visibilidad es nula y la potencia recibida será cero;

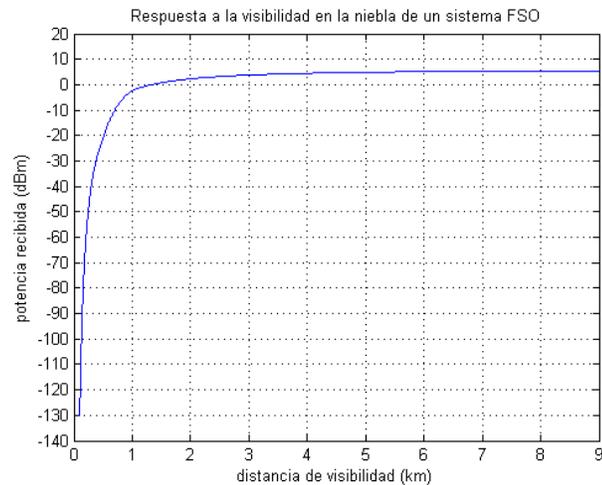


Figura 5.7: Gráfico potencia recibida vs. visibilidad con niebla para distancias de hasta 9 km

5.2.1 Resultados numéricos

Se simulará el sistema, bajo el escenario ciudad de Guayaquil, para mostrar resultados con lentes colimadores en la Tabla 9.

PARÁMETRO	VALOR EN dBm	Pérdida
Potencia pico	-10,36	
Potencia recibida total	-2,38	-8,09

Tabla 9: Tabla de resultados tras simular en niebla

5.2.2 Gráfico de respuesta en frecuencia

Como observamos en la ecuación 5.2, la atenuación por niebla sí es una variable dependiente de la longitud de onda de la señal. Por lo cual se procede a bosquejar un gráfico en MATLAB de potencia recibida contra

longitud de onda para observar cómo se comporta la señal bajo la niebla, bajo diferentes longitudes de onda, que se muestra en la Figura 5.8.

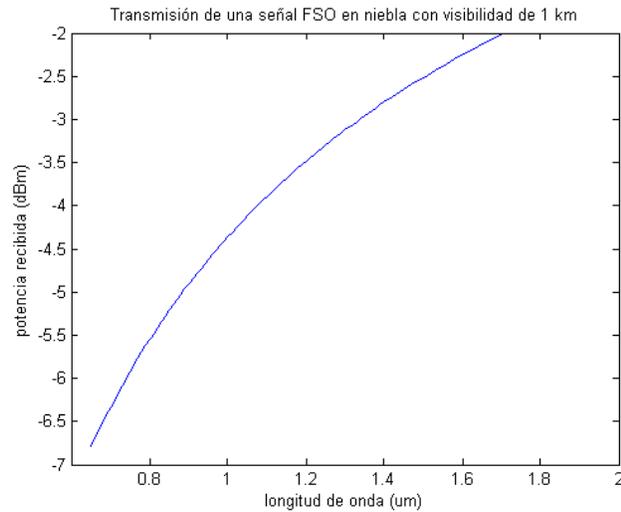


Figura 5.8: Gráfico potencia recibida vs. longitud de onda con longitudes de onda entre 0.65 μm y 1.55 μm

5.2.3 Gráfico de respuesta espacial

Se ejecuta nuevamente el programa principal, bajo los parámetros del escenario ciudad de Guayaquil, con lentes colimadores y con el efecto atmosférico de la niebla con el fin de observar la gráfica en la Figura 5.9.

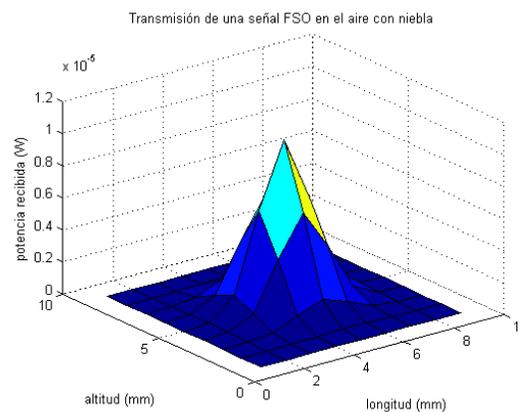


Figura 5.9: Gráfico potencia recibida (W) contra el plano irradiado a 0,8 km del emisor, con lentes colimadores

5.2.4 Análisis de resultados

Del gráfico de potencia recibida contra distancia, la Figura 5.6, se puede observar que se alcanza la potencia de umbral del receptor a la distancia de 1,6 kilómetros. Su comportamiento, a la escala graficada, es casi lineal. Del gráfico de potencia recibida contra visibilidad en la niebla, la Figura 5.7, se puede observar que se alcanza la potencia de umbral del receptor a una visibilidad en la niebla de 0,35 kilómetros. Su comportamiento, a la escala graficada, se observa una tendencia a ser una función potencial con exponente negativo (ver anexo). Del gráfico de respuesta de frecuencia, se observa un comportamiento logarítmico negativo; para el evento graficado, con $V = 1$, para las longitudes de onda de operación de los sistemas FSO se obtienen potencias recibidas de entre -2,0 dBm y -6,7 dBm, dentro del rango de operación, y describiendo un comportamiento casi lineal.

Se observa en la tabla de resultados de la simulación que es muy significativo el efecto de la niebla sobre la señal transmitida, sobre todo para visibilidades menores a 1 km. Por ahora, la niebla es el mayor factor de pérdidas en la señal. En cuanto al gráfico tridimensional, Figura 5.9, no se observa cambios en la forma de la señal, pero sí, y de manera significativa, una reducción de la magnitud de la potencia de pico.

5.3 Simulación de la respuesta impulso del sistema con lluvia

Empleándose la ecuación 3.5, con los parámetros descritos en el Capítulo 3:

$$L = 0.365 R^{0.63} \quad (5.3)$$

Se modela el efecto de la lluvia sobre la señal propagada, según [16] para $R \geq 7,6$ mm/h. Hay que notar que el parámetro de salida L es un valor de transmitancia. Y para la llovizna, según [16] para $0 < R < 3,8$ mm/h, esto es una lluvia de más baja intensidad, se modela empleando la ecuación 3.7, con los parámetros descritos durante el Capítulo 3:

$$L = 0.509 R^{0.63} \quad (5.4)$$

Para lluvias de intensidad mediada en el rango $3,8 \text{ mm/h} \leq R \leq 7,6 \text{ mm/h}$, siguiendo la ecuación 3.6, se modela el sistema bajo las variables asignadas dentro del capítulo 3:

$$L = 0.319 R^{0.63} \quad (5.5)$$

A continuación, se graficará la respuesta del sistema a la lluvia en varias distancias, manteniendo el valor de la precipitación anual R en 0.2 mm por hora, en la Figura 5.10.

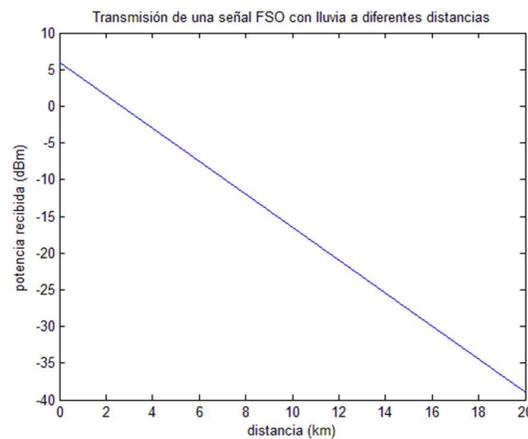


Figura 5.10: Gráfico potencia recibida vs. distancia con lluvia para distancias de hasta 20 km con precipitación de 0.2 mm/h

Para apreciar la diferencia con respecto a la transmisión en aire despejado, se graficará a continuación la resta entre la potencia recibida con aire despejado y la potencia recibida con lluvia, en la Figura 5.11.

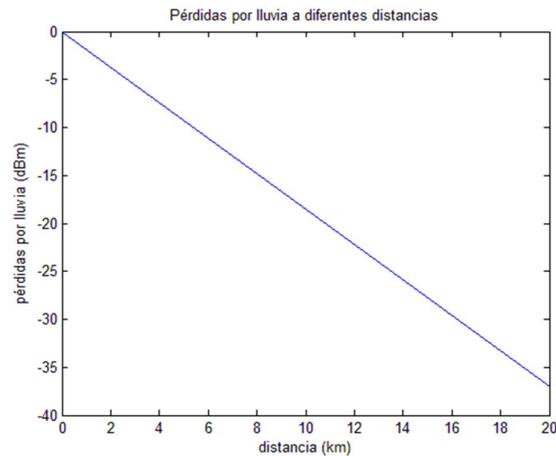


Figura 5.11: Gráfico pérdidas por lluvia vs. distancia con lluvia para distancias de hasta 20 km

A continuación, se graficará la respuesta del sistema a la lluvia en varias distancias, manteniendo el valor de la precipitación anual R en 100 mm por hora, en la Figura 5.12.

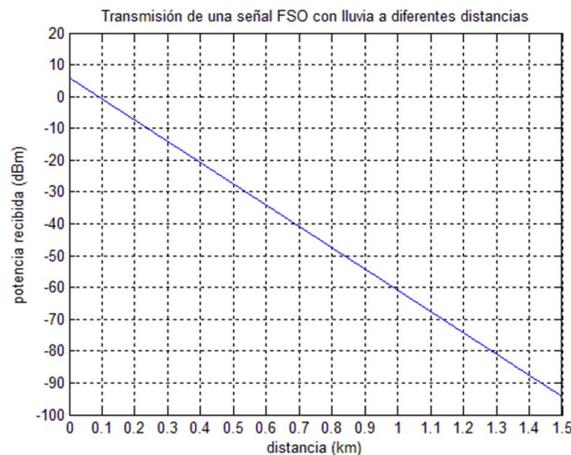


Figura 5.12: Gráfico potencia recibida vs. distancia con lluvia para distancias de hasta 1 km con precipitación de 100 mm/h. Clima lluvioso

Para apreciar la diferencia con respecto a la transmisión en aire despejado, se graficará la resta entre la potencia recibida con aire despejado y la potencia recibida con lluvia en la Figura 5.13.

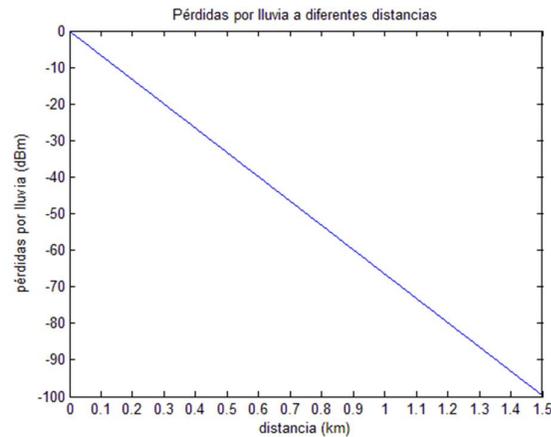


Figura 5.13: Gráfico pérdidas por lluvia vs. distancia con lluvia para distancias de hasta 1 km. Clima lluvioso

5.3.1 Resultados numéricos

Se simulará el sistema, bajo el escenario ciudad de Guayaquil, para mostrar resultados con lentes colimadores en la Tabla 10 mostrada a continuación. Para una precipitación de 0.2 mm/h y para una precipitación de 100 mm/h.

PARÁMETRO	CONDICIÓN	VALOR EN dBm	Pérdida
Potencia pico	Llovizna	-2,72	
Potencia recibida total	Llovizna	5,26	-1,48
Potencia pico	Lluvia	-55,41	
Potencia recibida total	Lluvia	-47,42	-53,14

Tabla 10: Tabla de resultados tras simular en lluvia

5.3.2 Gráfico de respuesta en precipitación

Como observamos en la ecuación 5.3, la ecuación 5.4 y la ecuación 5.5, la atenuación por lluvia y la atenuación por llovizna en el sistema no varían en función de la frecuencia de la señal que se propaga, salvo cuando se desvanece casi totalmente en el pico de absorción de los radicales libre OH⁻ a los 1410 nm. Sin embargo, la precipitación R es una variable dentro

de las ecuaciones, por lo que se procede a analizar la respuesta en precipitación del sistema graficándola, con el límite máximo de 200 mm/h que corresponde al perfil de una lluvia muy torrencial. Se grafica, en la Figura 5.14, la relación entre precipitación y potencia recibida.

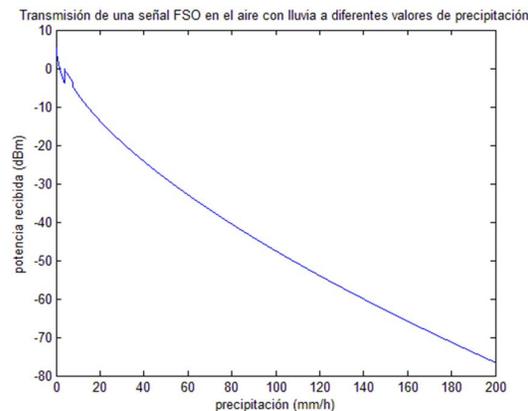


Figura 5.14: Gráfico potencia recibida vs. precipitación con lluvia para distancias de hasta 0.8 km

5.3.3 Gráfico de respuesta espacial

Se ejecuta nuevamente el programa principal, bajo los parámetros del escenario ciudad de Guayaquil con el efecto atmosférico de la lluvia para bosquejar la gráfica que se obtiene, en la Figura 5.15.

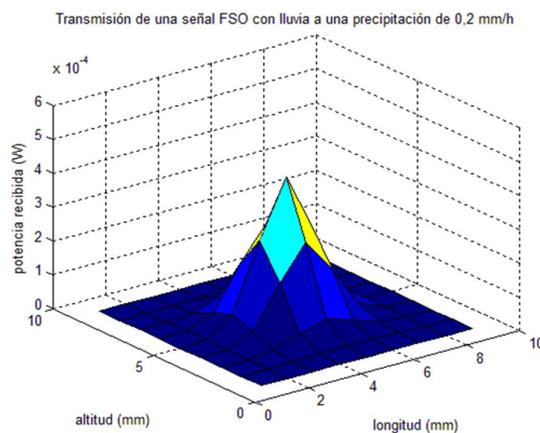


Figura 5.15: Gráfico potencia recibida contra el plano irradiado a 0,8 km del emisor, bajo llovizna, con lentes colimadores

5.3.4 Análisis de resultados

El valor de precipitación escogido para el escenario ciudad de Guayaquil, de $R = 0,2$ mm/h, corresponde según la fuente [16] a una llovizna. Del gráfico de potencia recibida contra distancia en llovizna, la Figura 5.10, se puede observar un comportamiento exponencial decreciente muy cercano a la linealidad, empezando por +7 dBm al inicio y terminando por los -37 dBm a 20 km de distancia entre ambos terminales FSO, muy parecido al aspecto del gráfico de potencia recibida contra distancia con el aire despejado, mostrado en la Figura 5.2. Esta última figura da una potencia recibida de +3 dBm a 1 km. Con el objeto de visualizar mejor la diferencia entre ambas gráficas, se ha graficado, ver Figura 5.11, la resta entre la potencia recibida con aire despejado y la potencia recibida con llovizna. Se visualiza que dicha diferencia crece de forma lineal negativa, llegando a ser de casi -2 dBm a un km. De lo cual puede sostenerse que, a una precipitación constante de 0.2 mm/h, la llovizna causa en el sistema pérdidas de -1,85 dB/km; superiores al aire despejado, pero inferiores a la niebla. En cambio, con una lluvia torrencial de 100 mm/h las pérdidas causadas al sistema son muy severas, de -53 dBm, ante lo cual éste podría operar a una distancia máxima estimada de 500 metros, o con un láser más potente, o con un fotorreceptor con mayor sensibilidad.

En cuanto a la respuesta a precipitación del sistema, a una precipitación de 0, es igual a evaluar el sistema sin lluvia. Se había hallado que, sin lluvia, la potencia recibida a una distancia de 0,8 km es de 0 dBm. En ambos casos, la lluvia y la llovizna, se observa una tendencia potencial decreciente en la respuesta a precipitación (ver anexo). Para la lluvia, la precipitación a la cual se alcanza la potencia de umbral de -30 dBm, a una distancia de 0,8 km, se estima en 58 mm/h. Se observa una discontinuidad para los primeros valores del gráfico, lo cual sugiere que la ecuación 5.5 no sería lo suficientemente confiable para modelar la lluvia mediana.

En cuanto al gráfico tridimensional, Figura 5.15, no se observa cambios en la forma de la señal, pero sí, y de manera ligera, una reducción de la magnitud de la potencia de pico.

5.4 Simulación de la respuesta impulso del sistema con aerosoles

Empleándose la ecuación 3.8, con los parámetros descritos durante el capítulo 3 [17]:

$$t_s = \exp\left(\frac{-3.91}{V}\left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q} R\right) \quad (5.6)$$

Se modela el efecto del polvo y aerosoles sobre la señal propagada. Hay que notar que el parámetro de salida t_s es un valor de transmitancia. Dado que en el Ecuador el Reglamento a Ley de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial prohíbe en su artículo 310 el uso de humo negro u otros similares por parte de los automotores [34]; los vehículos, por ley, emiten gases menos espesos. Teniendo en cuenta esta observación se realiza esta simulación con un valor alto de visibilidad del aire con polvo y aerosoles, de 10 km. Se revisa, a continuación, cómo varía la potencia recibida en función de la distancia recorrida R. Para este propósito se bosquejará un gráfico P_r contra R en MATLAB, mostrado en la Figura 5.16.

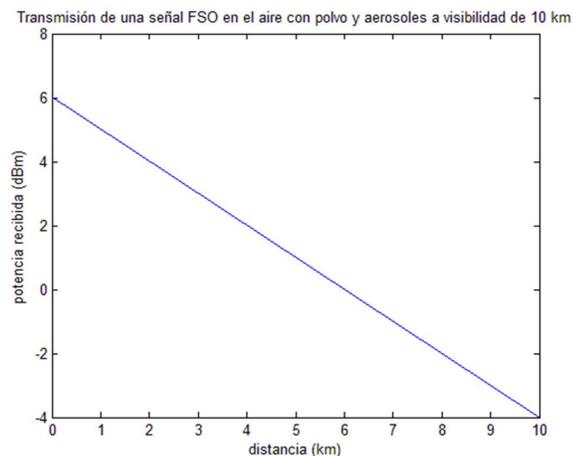


Figura 5.16: Gráfico potencia recibida vs. distancia con aerosoles para distancias de hasta 10 km

Para apreciar la diferencia con respecto a la transmisión en aire despejado, se graficará en la Figura 5.17 la resta entre la potencia recibida con aire despejado y la potencia recibida con polvo y aerosoles.

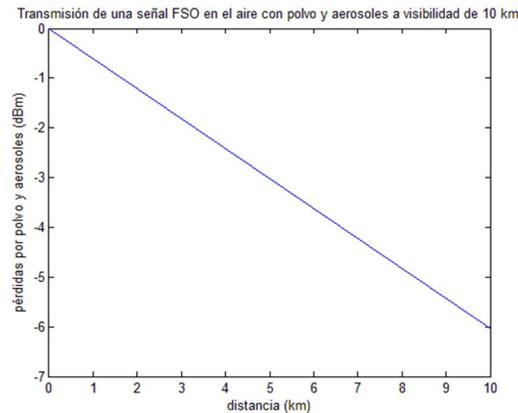


Figura 5.17: Gráfico pérdidas por polvo y aerosoles (dBm) vs. distancia para distancias de hasta 10 km

Como observamos en la ecuación 5.5, la visibilidad del aire con polvo y aerosoles V es una variable dentro de las ecuaciones, por lo que se procede a analizar la respuesta en precipitación del sistema graficándola, con el mínimo en 0,1 km el límite máximo de 20 km en la Figura 5.18, y de 1 km en la Figura 5.19. Se mantiene la distancia de 0.8 km del escenario ciudad de Guayaquil.

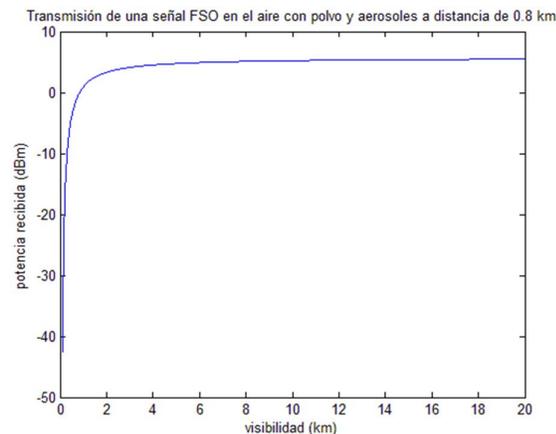


Figura 5.18: Gráfico potencia recibida vs. visibilidad del aire con polvo y aerosoles de hasta 20 km

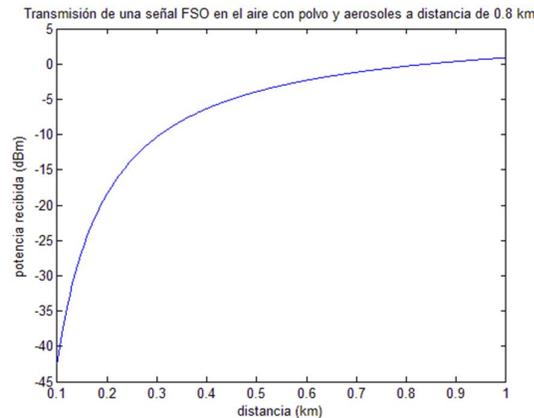


Figura 5.19: Gráfico potencia recibida vs. visibilidad del aire con polvo y aerosoles de hasta 1 km

5.4.1 Resultados numéricos

Se simulará el sistema, bajo el escenario ciudad de Guayaquil, para mostrar resultados con lentes colimadores en la Tabla 11.

PARÁMETRO	VALOR EN dBm	Pérdida
Potencia pico	-1,73	
Potencia recibida total	6,25	-0,48

Tabla 11: Tabla de resultados tras simular en aire con polvo y aerosoles

5.4.2 Gráfico de respuesta en frecuencia

Como observamos en la ecuación 5.5, la atenuación por el aire con polvo y aerosoles sí es una variable dependiente de la longitud de onda de la señal. Por lo cual se procede a bosquejar un gráfico en MATLAB de potencia recibida contra longitud de onda para observar cómo se comporta la señal en el aire con polvo y aerosoles, bajo diferentes longitudes de onda. Se graficará primero con una visibilidad superior a 1, en este caso la visibilidad del escenario ciudad de Guayaquil de 10; luego con una visibilidad menor a 1, de 0,5. El gráfico respectivo se muestra en la Figura 5.21.

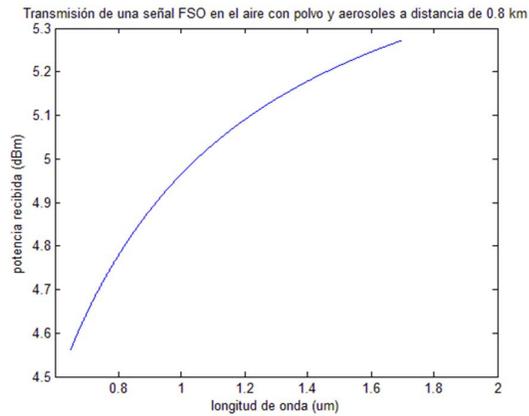


Figura 5.21: Gráfico potencia recibida vs. longitud de onda en el aire con polvo y aerosoles entre 0,65 μm y 1,55 μm

Para apreciar la diferencia con respecto a la transmisión en aire despejado, se graficará en la Figura 5.22 la resta entre la potencia recibida con aire despejado y la potencia recibida con polvo y aerosoles.

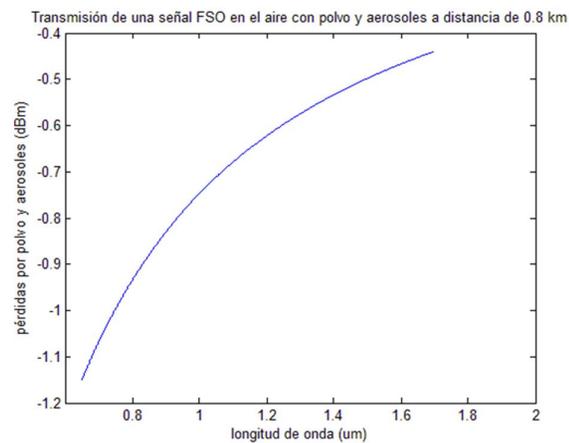


Figura 5.22: Gráfico pérdidas por polvo y aerosoles vs. longitud de onda en el aire con polvo y aerosoles entre 0,65 μm y 1,55 μm

5.4.3 Gráfico de respuesta espacial

Se ejecuta nuevamente el programa principal, bajo los parámetros del escenario ciudad de Guayaquil, con lentes colimadores y con el efecto atmosférico de polvo y aerosoles con el fin de observar la gráfica que se obtiene, que se muestra en la Figura 5.23. Se lo ejecuta bajo los parámetros del escenario ciudad de Guayaquil.

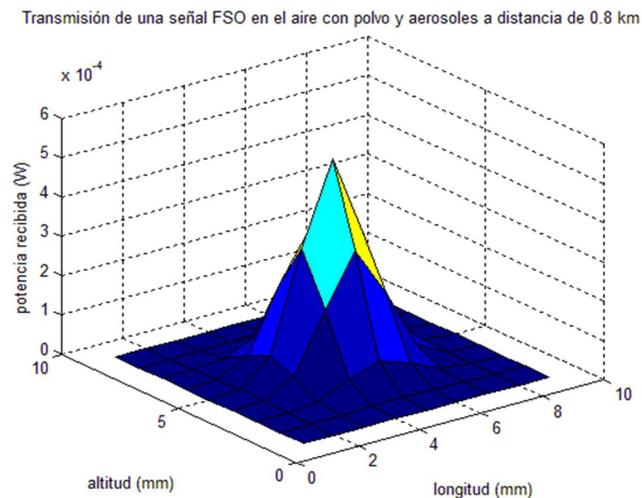


Figura 5.23: Gráfico potencia recibida contra el plano irradiado a 0,8 km del emisor, en aire con polvo y aerosoles, con lentes colimadores

5.4.4 Análisis de resultados

Del gráfico de potencia recibida contra distancia en aire con polvo y aerosoles, la Figura 5.14, se puede observar un comportamiento lineal, empezando por +7 dBm y terminando por los -3 dBm, muy parecido al aspecto del gráfico de potencia recibida contra distancia con el aire despejado, mostrado en la figura 5.2. Esta última figura da una potencia recibida de casi +6 dB a 1 km. Con el objeto de visualizar mejor la diferencia entre ambas gráficas, se ha graficado, ver Figura 5.15, la resta entre la potencia recibida con aire despejado y la potencia recibida con polvo y aerosoles. Se visualiza que dicha diferencia crece de forma lineal

negativa, llegando a ser de $-0,48$ dBm a un km. De lo cual puede sostenerse que, a una visibilidad de 10 km, el polvo y los aerosoles causan en el sistema pérdidas de $-0,48$ dB/km; ligeramente superiores al aire despejado, pero inferiores al de la lluvia y muy inferiores a la niebla.

En cuanto a la respuesta al rango de visibilidad en kilómetros del sistema, ver Figura 5.16 y Figura 5.17, a una visibilidad de 0, teóricamente y en la simulación, no hay transmisión de potencia. Se observa una tendencia potencial negativa (ver anexo), que corresponde con la forma de la función dada por la ecuación 5.6, en la respuesta al rango de visibilidad en kilómetros. Para el aire con polvo y aerosoles, la visibilidad a la cual se alcanza la potencia de umbral, a una distancia de 0.8 km, de -30 dBm se estima en 0,18 km.

La respuesta en frecuencia del sistema, ver Figura 5.19, nos muestra un comportamiento inverso negativo creciente. En él las menores longitudes de onda tienen las mayores pérdidas y las mayores longitudes de onda tienen las menores pérdidas. Obteniéndose la pérdida menor a $1,70 \mu\text{m}$, de $-0,44$ dBm. Obteniéndose la pérdida mayor a $0,65 \mu\text{m}$, de $-1,15$ dBm.

En cuanto al gráfico tridimensional, Figura 5.20, no se observa cambios en la forma de la señal, pero sí, y de manera ligera, una reducción de la magnitud de la potencia de pico.

5.5 Simulación de la respuesta impulso del sistema con obstáculos

Empleándose una matriz de obstaculización 'Pobs' de '1' y '0', que representan una escala continua en la que el '1' representa una cuadrícula totalmente despejada y el '0' representa una cuadrícula totalmente obstaculizada:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0.19 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

(5.7)

En el programa, se podrá escoger entre un obstáculo plano y un obstáculo irregular. El obstáculo plano es un obstáculo de tamaño mayor al de la matriz de irradiación, y cuyo borde es horizontal. Este obstáculo es simulado, primero generando una matriz de '1' de la misma dimensión de la matriz de irradiación. Segundo, se recorre la matriz, llenando las filas de '0' hasta la posición que corresponde al porcentaje de obstaculización deseado. En caso de que el porcentaje de obstaculización se corresponda con un número no entero de fila, la fila que corresponde al entero menor más próximo del porcentaje deseado, se llenará sus celdas con un valor entre 0 y 1. De esta forma se genera la matriz de obstaculización.

En el caso de un obstáculo irregular, la matriz de obstaculización está escrita manualmente en el código fuente, y siempre con la misma dimensión de la matriz de irradiación. E implementándose en MATLAB la función que permite sumar los valores de la matriz de obstaculización. Su resultado será dividido para la dimensión de la matriz obteniéndose así el porcentaje de obstaculización. En el escenario ciudad de Guayaquil, se trabaja con un porcentaje de obstaculización del 1%, ver Tabla 6. La matriz de obstaculización se la multiplica, valor a valor con el operador '.', obteniéndose el efecto de la obstaculización del haz de luz propagado.

$$P_R = P_r \times P_{obs} \quad (5.8)$$

A continuación, se graficará la respuesta del sistema al porcentaje de obstaculización del haz de luz propagado. Para efectos del gráfico, el porcentaje

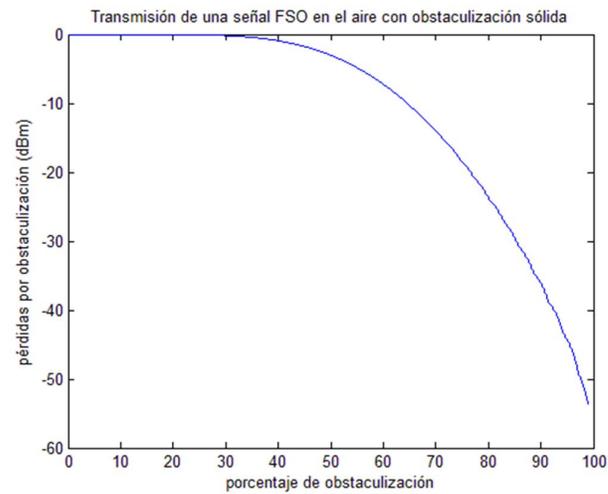


Figura 5.26: Gráfico pérdidas por obstaculización vs. porcentaje de obstaculización del haz de luz transmitido

Utilizando la ecuación 3.9 [18] hallamos el ancho de la 1° zona de Fresnel para las longitudes de onda de operación de los sistemas FSO, medida desde el centro del haz de luz emitido, y a la distancia en la cual su ancho es máximo que es la mitad de la distancia entre ambos terminales FSO; lo cual se puede visualizar en el gráfico exhibido por la Figura 5.27.

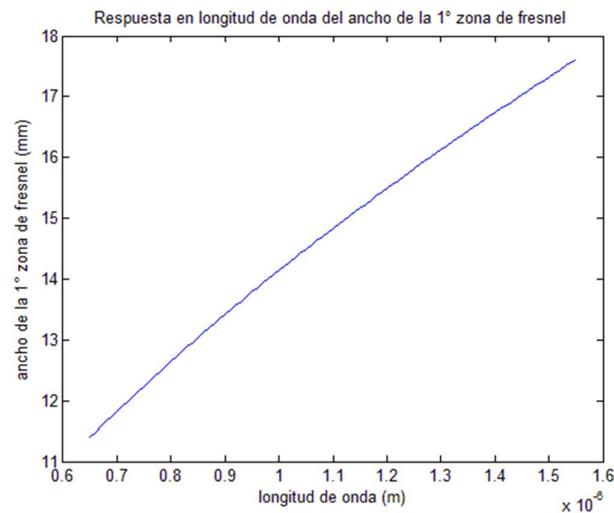


Figura 5.27: Gráfico longitud de onda vs. ancho de la primera zona de Fresnel en la mitad de la trayectoria

5.5.1 Resultados numéricos

Se simulará el sistema, bajo el escenario ciudad de Guayaquil, para mostrar resultados con lentes colimadores en la Tabla 12.

PARÁMETRO	VALOR EN dBm	Pérdida
Potencia pico	-1,4266	
Potencia recibida total	6,7349	$-1,9 \cdot 10^{-4}$

Tabla 12: Tabla de resultados tras simular en aire con obstáculo sólido

5.5.2 Gráfico de respuesta espacial

Se ejecuta nuevamente el programa principal, bajo los parámetros del escenario ciudad de Guayaquil, con lentes colimadores y con el efecto de interponer un obstáculo sólido en la trayectoria de la señal emitida con el fin de observar la gráfica que se obtiene en la Figura 5.28. Se lo ejecuta bajo los parámetros del escenario ciudad de Guayaquil.

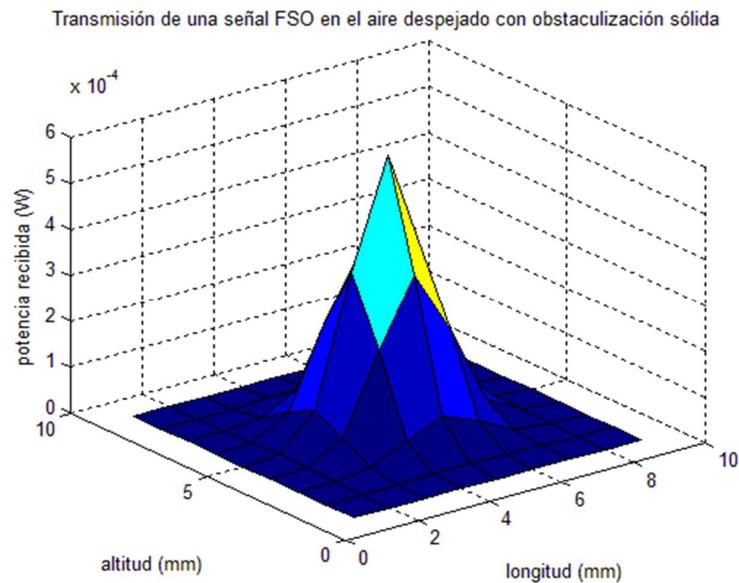


Figura 5.28: Gráfico potencia recibida contra el plano irradiado a 0,8 km del emisor, en aire con obstáculo sólido al 1%

5.5.3 Análisis de resultados

Del gráfico de potencia recibida contra porcentaje de obstaculización, en la Figura 5.24, se puede observar un comportamiento inverso negativo parecido al histograma estadístico de la ojiva. En el escenario ciudad de Guayaquil, y teniendo, y en observancia de la Figura 5.24, la señal alcanza la potencia de umbral de -30 dB cuando ésta es obstaculizada en un 82% o más.

El impacto en la señal de la obstaculización del 1% estipulada para este escenario ocasiona un impacto insignificante del orden de $1E-4$. En cuanto al gráfico tridimensional de potencia recibida en el plano irradiado relacionado al terminal FSO receptor, Figura 5.27, se observa un cambio en la forma de la señal, una bajada hacia el borde del eje de longitud mientras no se observan cambios en la magnitud de la potencia de pico.

5.6 Simulación de la respuesta impulso del sistema en las condiciones de Guayaquil en clima seco

Se procede ahora a simular el sistema con todas las variables ambientales del escenario ciudad de Guayaquil, para un clima seco. Esto es, con lentes colimadores, con niebla, con llovizna a una precipitación instantánea de 0,2 mm/h, con polvo y aerosoles y con obstáculo sólido en las magnitudes establecidas para el escenario. Debido a que ya no se analizará cada etapa del sistema de manera independiente, este subcapítulo tiene una estructura diferente a la de los subcapítulos anteriores.

5.6.1 Resultados numéricos

Se simulará el sistema, bajo el escenario ciudad de Guayaquil, con los valores de los parámetros mostrados en la Tabla 7, y siguiendo el procedimiento detallado durante el Capítulo 4, para mostrar resultados con lentes colimadores. Los resultados de la simulación se muestran en la Tabla 13.

PARÁMETRO	EFEECTO	VALOR EN dBm	Pérdida
Potencia transmitida		6,94	
Potencia recibida		5,71	-1,24
	Niebla	-2,38	-8,09
	Lluvia	-3,86	-1,48
	Polvo y aerosoles	-4,34	-0,48
	Obstáculo	-4,34	-1,9E-04

Tabla 13: Tabla de resultados tras simular el escenario ciudad de Guayaquil completo

5.6.2 Simulación para diferentes distancias

Se simula con todos los efectos atmosféricos y de obstáculo el escenario ciudad de Guayaquil para diferentes distancias entre los terminales FSO. La transmisión de la señal, el efecto de la lluvia, el efecto de la niebla y el efecto del polvo y aerosoles varían en función de la distancia entre los terminales. A continuación, la Figura 5.28 muestra el gráfico de potencia recibida contra distancia.

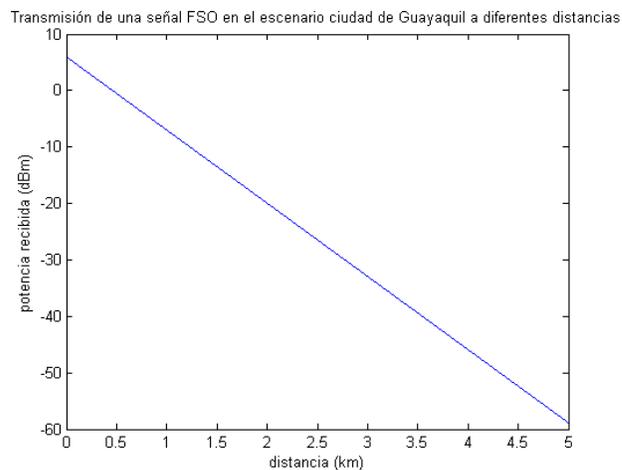


Figura 5.28: Gráfico potencia recibida vs. distancia simulación completa

Se observa en el gráfico un comportamiento lineal decreciente de la distancia, y el umbral de los -30 dBm es alcanzado a la distancia de 2,78 km.

5.6.3 Simulación para diferentes longitudes de onda

Cumplíndose la relación entre longitud de onda y frecuencia a través de la velocidad de la luz, la simulación del sistema a diferentes longitudes puede interpretarse como una respuesta en frecuencia del mismo. Se simula con todos los efectos atmosféricos y de obstáculo el escenario ciudad de Guayaquil para diferentes longitudes de onda de la banda de operación de los sistemas FSO. El efecto de la niebla y el efecto del polvo y aerosoles varían en función de la longitud de onda del haz de luz emitido. En base a las simulaciones de respuesta a longitud de onda de los efectos de niebla y de polvo y aerosoles, no se prevé variaciones de potencia que estén fuera del umbral de -30 dBm. A continuación, la Figura 5.29 muestra el gráfico de potencia recibida contra longitud de onda.

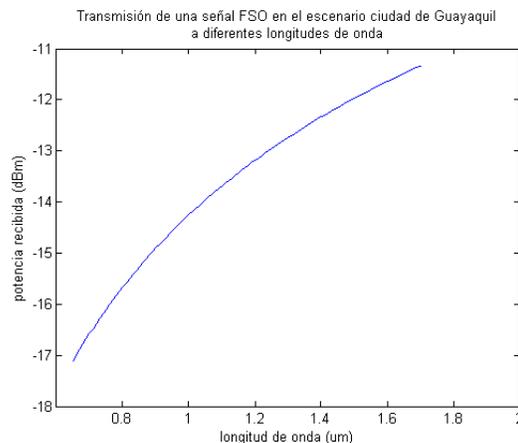


Figura 5.29: Gráfico potencia recibida vs. longitud de onda simulación completa

Con la finalidad de observar cuál sería la longitud de onda de corte del sistema, éste es simulado para un rango de longitudes de onda menores. A continuación, la Figura 5.30 muestra la gráfica respectiva.

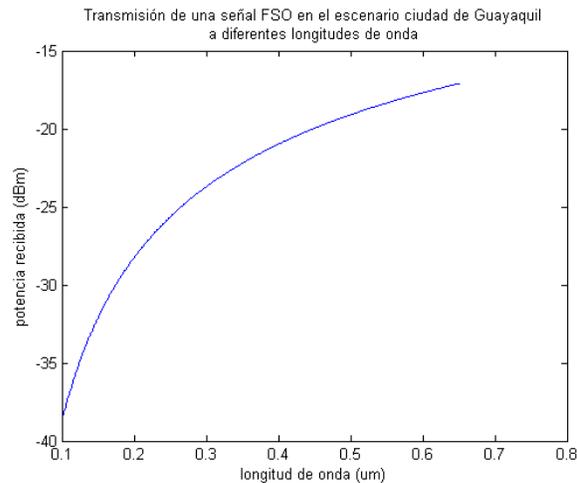


Figura 5.30: Gráfico potencia recibida vs. longitud de onda simulación completa. Longitudes de onda menores

Se observa en el último gráfico la longitud de onda de corte a 170 nm.

5.6.4 Cálculo de la tasa de error del sistema

Para calcular la tasa de error del sistema es necesario hallar la potencia recibida en el terminal FSO receptor y la potencia del ruido en el terminal FSO receptor, para ello nos basaremos en la relación señal a ruido para un sistema de comunicación óptica [29]:

$$SNR = \frac{(R_o P_r)^2}{2q(R_o P_r + I_D)B + 2qI_L B + 4kTB/R_{eq}} \quad (5.9)$$

De donde R_o es la tasa de transferencia del fotorreceptor, P_r es la potencia recibida, q es el valor de la carga de un electrón ($1,69E-19$ C), I_D es la corriente oscura del fotorreceptor, B es el ancho de banda transmitido, k es la constante de Boltzman ($1,3806E-23$ J/K) y R_{eq} es la resistencia equivalente del circuito eléctrico. Se muestran en la Tabla 14 a continuación los parámetros del circuito de recepción y de ruido empleados para esta simulación.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
R_o	0.9	A/W
Q	1.69E-19	C
I_d	40	nA
B	1.418	GHz
K	1.381E-23	J/K
T	300	K
Req	330	Ohms
SNR deseado	10	

Tabla 14: Parámetros para calcular ruido del terminal FSO receptor y SNR

Se tiene la relación entre el SNR y la tasa de error, que es equivalente a la probabilidad de que se reciba un bit erróneo en el sistema FSO simulado, que viene dada por:

$$BER_{OOK} = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{\frac{1}{SNR_{deseado}}} \right) * \exp\left(-\frac{SNR}{4}\right) \quad [30] \quad (5.10)$$

Debido a que durante esta simulación se transmite un solo bit, la tasa de error de bit y la probabilidad de error son equivalentes. Se calcula, aplicando el simulador de MATLAB, la relación señal a ruido en valores decimales y la tasa de error para cada uno de los valores de potencia recibida, tras pasar la señal por cada uno de los efectos atmosféricos modelados durante este trabajo. Los resultados de dichos cálculos se muestran en la Tabla 15 a continuación:

PARÁMETRO	EFEECTO	SNR (decimal)	Probabilidad de error	BER
Potencia recibida		4,57E+6	0	0
	Niebla	3,42E+6	0	0
	Lluvia	4,75E+5	0	0
	Polvo y aerosoles	2,82E+5	0	0
	Obstáculo	2,82E+5	0	0

Tabla 15: Tabla de resultados de SNR y BER tras simular el escenario ciudad de Guayaquil completo. Clima seco

En términos de tasa de error, puede decirse que todos los resultados obtenidos son satisfactorios, al menos para un sistema de comunicación simple que no requiere tasas de error inferiores a $1E-12$ bits. Se registran probabilidades de error de cero, debido a que los valores calculados se hallan inferiores al rango soportado por MATLAB.

De la gráfica de potencia recibida contra distancia, ver Figura 5.27, se puede observar una relación lineal decreciente entre la distancia y la potencia recibida que la potencia de umbral de -30 dBm puede alcanzarse aproximadamente a los 2,78 km. A una distancia 0, se obtiene la potencia del terminal emisor; esto es indicio de que el sistema se encuentra bien calibrado.

Evaluando las ecuaciones 5.9, para cálculo de SNR, y 5.10, para cálculo de tasa de error de bit, para diferentes valores de potencia recibida; se determina que la tasa de error de bit de $1E-04$ se alcanza a una potencia recibida de $-27,5$ dBm. Dicha potencia es alcanzada a los 2,53 km. Siguiendo el mismo método, se determina que a los 2,43 km se alcanza la tasa de error de bit de $1E-12$.

Empleando el método de Montecarlo, se calcula la probabilidad de que se obtenga una SNR superior a la SNR deseada del sistema de 10 unidades, en función de la potencia recibida en dBm, calculándose la SNR 10000 veces. En dicho cálculo, se trata el ruido blanco como una variable aleatoria uniforme cuyo valor RMS está dado por la fórmula analítica de ruido blanco que forma parte de la ecuación 5.9. La gráfica respectiva se muestra a continuación en la Figura 5.31.

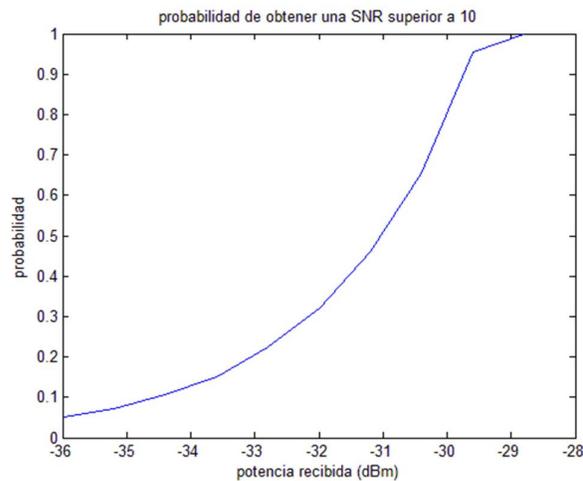


Figura 5.31: Gráfico potencia recibida vs. probabilidad de obtenerse una SNR deseada

Durante la obtención de esta última gráfica, se demuestra que converge a 1 la probabilidad de obtenerse una SNR idónea para el sistema a una potencia recibida superior a -30 dBm.

5.7 Simulación de la respuesta impulso del sistema en las condiciones de Guayaquil en clima lluvioso

Se procede ahora a simular el sistema con todas las variables ambientales del escenario ciudad de Guayaquil con lluvia torrencial. Esto es, con lentes colimadores, con niebla, con lluvia a una precipitación instantánea de 100 mm/h, con polvo y aerosoles y con obstáculo sólido en las magnitudes establecidas para el escenario. Debido a que ya no se analizará cada etapa del sistema de manera

independiente, este subcapítulo tiene una estructura diferente a la de los subcapítulos anteriores.

5.7.1 Resultados numéricos

Se simulará el sistema, bajo el escenario ciudad de Guayaquil, con los valores de los parámetros mostrados en la tabla 7, y siguiendo el procedimiento detallado durante el capítulo 4, para mostrar resultados con lentes colimadores en la Tabla 16 a continuación.

PARÁMETRO	EFFECTO	VALOR EN dBm	Pérdida
Potencia transmitida		6,94	
Potencia recibida		5,71	-1,24
	Niebla	-2,38	-8,09
	Lluvia	-55,51	-53,13
	Polvo y aerosoles	-60,00	-0,48
	Obstáculo	-60,00	-1,9E-04

Tabla 16: Tabla de resultados tras simular el escenario ciudad de Guayaquil completo

5.7.2 Simulación para diferentes distancias

Se simula con todos los efectos atmosféricos y de obstáculo el escenario ciudad de Guayaquil para diferentes distancias entre los terminales FSO. La transmisión de la señal, el efecto de la lluvia, el efecto de la niebla y el efecto del polvo y aerosoles varían en función de la distancia entre los terminales. A continuación, la Figura 5.32 muestra el gráfico de potencia recibida contra distancia.

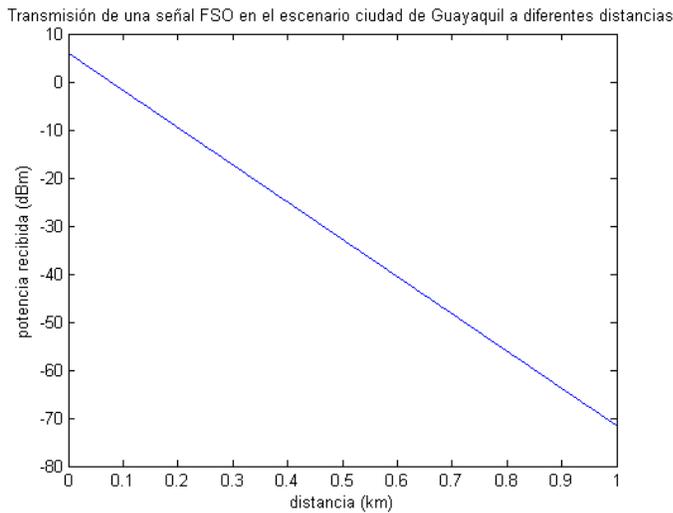


Figura 5.32: Gráfico potencia recibida vs. distancia simulación completa

Se observa en el gráfico un comportamiento lineal decreciente de la potencia recibida con la distancia, y el umbral de los -30 dBm es alcanzado a la distancia de $0,464$ km.

5.7.3 Simulación para diferentes longitudes de onda

Cumpléndose la relación entre longitud de onda y frecuencia a través de la velocidad de la luz, la simulación del sistema a diferentes longitudes de onda puede interpretarse como una respuesta en frecuencia del mismo. Se simula con todos los efectos atmosféricos y de obstáculo el escenario ciudad de Guayaquil para diferentes longitudes de onda de la banda de operación de los sistemas FSO. El efecto de la niebla y el efecto del polvo y aerosoles varían en función de la longitud de onda del haz de luz emitido. En base a las simulaciones de respuesta a longitud de onda de los efectos de niebla y de polvo y aerosoles, no se prevé variaciones de potencia que estén fuera del umbral de -30 dBm. A continuación, la Figura 5.33 muestra el gráfico de potencia recibida contra longitud de onda.

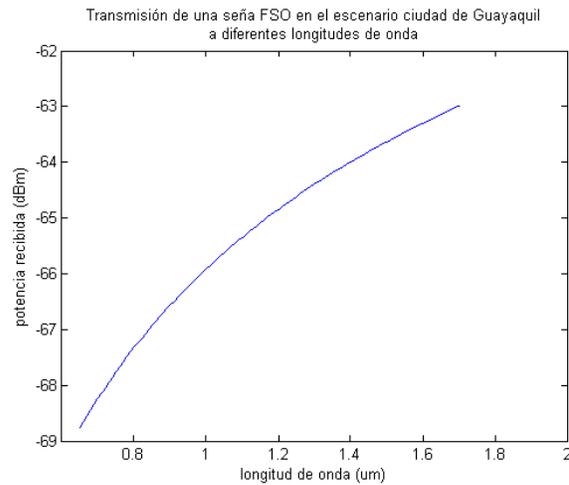


Figura 5.33: Gráfico potencia recibida vs. longitud de onda simulación completa

Con la finalidad de observar cuál sería la longitud de onda de corte del sistema, éste es simulado para un rango de longitudes de onda mayores. A continuación, la Figura 5.34 muestra la gráfica respectiva.

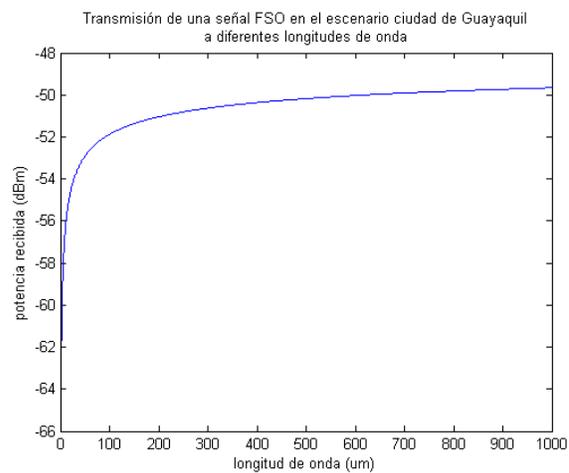


Figura 5.34: Gráfico potencia recibida vs. longitud de onda simulación completa. Longitudes de onda menores

Se observa en el último gráfico una asintota horizontal a -49 dBm, por lo cual no hay frecuencia de corte.

5.7.4 Cálculo de la tasa de error del sistema

Tomando los datos de la Tabla 14 se calcula, aplicando en MATLAB la ecuación 5.9; la relación señal a ruido y la tasa de error para cada uno de los valores de potencia recibida, tras pasar la señal por cada uno de los efectos atmosféricos modelados durante este trabajo. Los resultados de dichos cálculos se muestran en la Tabla 17 a continuación.

PARÁMETRO	EFECTO	SNR	PROBABILIDAD DE ERROR	BER
Potencia recibida		3,42E+6	0	0
	Niebla	4,74E+5	0	0
	Lluvia	8,97E-5	0,658	0,658
	Polvo y aerosoles	7,18E-5	0,658	0,658
	Obstáculo	7,18E-5	0,658	0,658

Tabla 17: Tabla de resultados de SNR y BER tras simular el escenario ciudad de Guayaquil completo. Clima lluvioso.

En términos de tasa de error, puede decirse que todos los resultados obtenidos no son satisfactorios, al menos para un sistema de comunicación simple que no requiere tasas de error inferiores a $1E-12$ bits.

De la gráfica de potencia recibida contra distancia, ver figura 5.26, se puede observar una relación lineal decreciente entre la distancia y la potencia recibida que la potencia de umbral de -30 dBm puede alcanzarse aproximadamente a los $0,464$ km. A una distancia 0, se obtiene la potencia del terminal emisor; esto es indicio de que el sistema se encuentra bien calibrado.

Evaluando las ecuaciones 5.9, para cálculo de SNR, y 5.10, para cálculo de tasa de error de bit, para diferentes valores de potencia recibida; se

determina que la tasa de error de bit de $1E-04$ se alcanza a una potencia recibida de $-27,5$ dB. Dicha potencia es alcanzada a los $0,405$ km. Siguiendo el mismo método, se determina que a los $0,388$ km se alcanza la tasa de error de bit de $1E-12$.

5.8 Simulación de la respuesta impulso para una red de soporte para televisión digital terrestre

Los requerimientos mínimos para la televisión digital terrestre son una potencia de -30 dBm y una tasa de error de $2E-7$ bits. Sin embargo, estos sistemas son diseñados para modulación M – QAM [30]. Siendo la respuesta a impulso una señal bajo modulación OOK, este escenario no cumple con todos los requerimientos para la transmisión de televisión digital terrestre. Los sistemas de modulación M – QAM presentan tasas de error diferentes a los sistemas OOK. La tasa de transmisión de $4,184$ Gbps. sí es adecuada para un sistema de televisión digital terrestre.

En el trabajo realizado para la tesis de ingeniería por M. Estrella y A. Panchana, se ha estudiado la construcción de una red para televisión digital para extender la cobertura de ESPOL-TV hacia las poblaciones de Santa Elena y Playas. Dicha red consiste en una fibra óptica que enlaza el estudio principal con una antena de retransmisión ubicada en un cerro de la ciudad, la cual transmite hacia puntos de retransmisión ubicados en Santa Elena y Playas. Este escenario consistirá en la simulación de un enlace de respaldo FSO entre el estudio principal, ubicado en el cerro El Carmen, y el cerro ubicado en la ESPOL Campus La Prosperina en el que está ubicado el punto de transmisión de la señal. Este último enlace, en el trabajo original, se da por medio de fibra óptica [32].

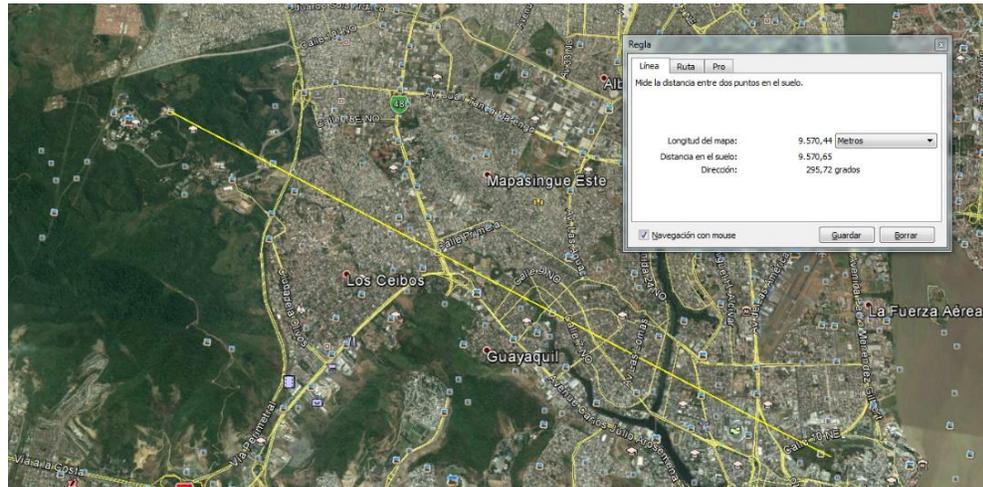


Figura 5.35: Ilustración del enlace FSO de soporte para la red de televisión digital terrestre a simularse

La Figura 5.35 muestra la trayectoria seguida del enlace de respaldo FSO entre el estudio principal, ubicado en el cerro El Carmen, y el cerro ubicado en la ESPOL Campus La Prosperina en el que está ubicado el punto de transmisión de la señal. La imagen, tomada de Google Earth, muestra una distancia horizontal entre los terminales FSO de 9,57044 km, a una altura de 63 metros, y una distancia tomando en cuenta la diferencia entre las alturas de los terminales FSO de 9,57065 km, a una altura de 94 metros.

Se emplearán para la simulación de este enlace las características de los terminales FSO y las condiciones atmosféricas del escenario ciudad de Guayaquil, mostrados en la Tabla 6, con la excepción de la atenuación por lluvia para la que se emplearán las condiciones climáticas de una lluvia durante la estación de invierno, a una precipitación instantánea de 49,3 mm/h que corresponde a la lluvia más intensa de enero 2017 registrada en el sitio web de INOCAR [33]. En la Tabla 18 mostrada a continuación se muestran los parámetros de entrada para la simulación en este escenario.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Po	5	mW
λ	1.55	μm
Apertura emisor	0.8	Cm
Apertura receptor	0.8	Cm
Ángulo de apertura del emisor	8	$^{\circ}$
Transmitancia lentes colimadores	0.9	
Distancia	9.57	Km
Precipitación	49.3	mm/h
Visibilidad niebla	1	Km
Visibilidad aerosoles	10	Km

Tabla 18: Parámetros para la simulación del enlace FSO para la red de soporte de televisión digital terrestre

5.8.1 Resultados numéricos

Se simula el sistema FSO para el actual escenario de enlace de soporte para televisión digital terrestre con todos los efectos atmosféricos modelados para este trabajo. A continuación, se muestra la Tabla 19 con los resultados de la simulación de dicho enlace con los parámetros mostrados en la Tabla 15 mostrada anteriormente.

PARÁMETRO	EFEECTO	VALOR EN dBm	Pérdida
Potencia transmitida		6,95	
Potencia recibida		2,20	-4,74
	Niebla	-94,60	-96,80
	Lluvia	-501,70	-407,10
	Polvo y aerosoles	-507,46	-5,77
	Obstáculo	-507,46	-5,2E-5

Tabla 19: Tabla de resultados tras simular el escenario de televisión digital terrestre

Como es de observarse, la potencia se recibe a un valor demasiado bajo. Se está operando con valores altos de precipitación y abarcando una distancia superior a la distancia típica de operación de los sistemas FSO.

5.8.2 Simulación con parámetros modificados

Se simulará el sistema, entonces para condiciones ambientales óptimas; esto es, casi sin lluvias, cielo despejado. Los valores para tales condiciones óptimas se muestran en la Tabla 20 mostrada a continuación.

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Precipitación	0.2	mm/h
Visibilidad niebla	10	km
Visibilidad aerosoles	10	Km

Tabla 20: Parámetros modificados para la simulación del enlace FSO para la red de soporte de televisión digital terrestre

A continuación, se muestra la Tabla 21 con los resultados de la simulación de dicho enlace.

PARÁMETRO	EFEECTO	VALOR EN dBm	Pérdida
Potencia transmitida		6,95	
Potencia recibida		2,20	-4,74
	Niebla	-2,02	-4,22
	Lluvia	-19,69	-17,67
	Polvo y aerosoles	-25,46	-5,77
	Obstáculo	-25,46	-5,2E-5

Tabla 21: Tabla de resultados tras simular el escenario de televisión digital terrestre

Como es de observarse en la tabla anterior, la potencia se recibe a un valor adecuado de -25,46 dBm., al cual se le corresponde una SNR de 109,5, calculado en función del valor RMS del ruido, y una probabilidad de error de bit de $8,45E-13$. Aplicándose el método de Montecarlo, dicha potencia recibida se corresponde con una probabilidad de obtenerse una SNR superior a 10 del 100%.

5.9 Rango de operación del escenario simulado

A continuación se recopilarán los datos obtenidos durante las simulaciones realizadas para el escenario ciudad de Guayaquil para señalar el rango de operación del sistema. Esto bajo el escenario simulado y modificando individualmente cada variable independiente hasta alcanzar la potencia de umbral de -30 dBm. Los valores límite del rango de operación, para clima seco, se muestran en la Tabla 22, a continuación.

PARÁMETRO	EFEECTO	Mínimo	Valor Actual	Máximo
Distancia	Todos		0,80 km	2,78 km
Longitud de onda	Niebla, Aerosoles	120 nm	1550 nm	
Visibilidad en niebla	Niebla	0,38 km	0,8 km	
Precipitación	Lluvia		0,2 mm/h	17,3
Visibilidad en aerosoles	Aerosoles	0,29 km	10 km	
% de obstaculización	Obstáculo		1%	75%

Tabla 22: Rango de operación de este escenario de simulación. Clima seco

En cambio, en la simulación del escenario bajo un clima lluvioso bajo una precipitación instantánea de 100 mm/h, se recibió una potencia debajo del valor de umbral de -30 dBm. Ante lo cual, debido a las características del modelo matemático del sistema, sólo se obtiene la distancia máxima entre los terminales FSO. A continuación, se muestra en una tabla los umbrales de operación del escenario ciudad de Guayaquil bajo clima lluvioso bajo una precipitación instantánea de 100 mm/h. Los valores límite del rango de operación, para clima lluvioso, se muestran en la Tabla 23 a continuación.

PARÁMETRO	EFEECTO	Mínimo	Valor Actual	Máximo
Distancia	Todos		0,80 km	0,33 km
Longitud de onda	Niebla, Aerosoles		1550 nm	
Visibilidad en niebla	Niebla		1 km	
Visibilidad en aerosoles	Aerosoles		10 km	
% de obstaculización	Obstáculo		1%	

Tabla 23: Rango de operación de este escenario de simulación. Clima lluvioso

La longitud de onda de umbral se la obtiene de la figura 5.30 para la simulación en clima seco. El umbral para visibilidad en la niebla se lo observa en la figura 5.7. El umbral para visibilidad en polvos y aerosoles se lo observa en la figura 5.18. El umbral para visibilidad en porcentaje de obstaculización de la primera zona de fresnel se lo observa en la figura 5.24.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se cumplió el objetivo de simular los diferentes escenarios en condiciones atmosféricas estimadas para el clima y las emisiones de smog y polvo en la ciudad de Guayaquil dado que se contó a la mano con todos los modelos matemáticos para programarlos en el simulador de MATLAB. Se ha modelado la ampliación del haz de luz emitido hacia el terminal FSO receptor, el efecto de la lluvia, el efecto de la llovizna, el efecto del polvo y los aerosoles y el efecto de añadir un obstáculo sólido que obstruya la trayectoria del haz.

El uso de lentes colimador, como se ha constatado en esta simulación, es decisivo para un sistema FSO. Sin su uso, la dispersión del haz de luz ocasionaría pérdidas muy altas. En el escenario simulado, la ausencia de lentes colimadores ocasiona que la señal llegue por debajo de la potencia de umbral del terminal FSO receptor. Se recomienda, cuando éstos sean implementados, recubrir el trayecto entre la fuente del haz de luz o el fotorreceptor y la cara interior del lente colimador, y limpiar periódicamente la cara exterior del lente colimador.

En esta simulación se puede constatar que la lluvia ocasiona el mayor impacto sobre la potencia recibida. 100 mm/h es el ejemplo de un valor de lluvia muy torrencial que se produce en la ciudad de Guayaquil durante la estación invernal, y como se constata en la figura 5.15 cae fuera del rango de operación del sistema simulado. Después de la lluvia, la niebla provoca el mayor impacto sobre la señal recibida.

En esta simulación se puede constatar que, bajo valores bajos de lluvia, la niebla ocasiona el mayor impacto sobre la potencia recibida. Esta es una explicación plausible para que las búsquedas en internet de “free space optics” generen más resultados de trabajos relacionados a los efectos de la niebla sobre un canal FSO.

Sin embargo, la respuesta a impulso del sistema FSO no cumple con uno de los requerimientos para la transmisión de televisión digital terrestre. Este requerimiento refiere a la técnica de modulación empleada, mientras la televisión digital terrestre opera con M – QAM, la respuesta a impulso obtenida es un pulso modulado en OOK. Además, se obtuvo un valor de potencia de llegada inferior al umbral. Por lo cual, no

se cumple el objetivo de simular la respuesta a impulso para una red de soporte de televisión digital terrestre.

En cuanto a marco legal, se ha investigado que sólo hay limitaciones en cuanto a la potencia que se puede irradiar desde un terminal FSO emisor debido a los límites de tolerancia del ojo humano hacia la radiación luminosa.

Se sugiere, como trabajo futuro, realizar estudios en campo que determinen en las condiciones de la ciudad de Guayaquil una respuesta en frecuencia de la luz con respecto a la lluvia, en la banda de $0,65 \mu\text{m} - 1,70 \mu\text{m}$, con la finalidad de medir la magnitud y la fase del pico de agua ubicado en la longitud de onda de $1,41 \mu\text{m}$.

Se sugiere como otros trabajos futuros, medir en campo la visibilidad por niebla en diferentes localidades de la ciudad y a diferentes épocas del año, medir en campo la visibilidad por niebla en diferentes localidades de la ciudad y a diferentes épocas del año, analizar la respuesta a impulso de un sistema FSO en un escenario multi-trayectoria.

Con el modelo de la respuesta a impulso resuelto, puede entonces emplearse este trabajo para modelar otros sistemas FSO lineales. Otro trabajo futuro puede ser el de simular la respuesta a un bit M-QAM de un sistema FSO para una red de soporte de televisión digital terrestre.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Barnes and B. Sakandar, "Cisco LAN Switching Fundamentals". Richardson, TX, USA: Cisco Press, 2004, pp. 6-7.
- [2] (2017, enero 2) Búsqueda en EBay de "Free Space Optics products" [buscador de artículos a la venta online]. Disponible en: <http://www.ebay.com/cln/usefulthings-at/free-space-optics-fso/210234804018>
- [3] E. Townsley and A. Robinson, "Critical technology assessment in Israel and NATO nations". Washington, DC, USA: Oficina de la Subsecretaría de Defensa (documento desclasificado) 1987, pp. III-28
- [4] B. Saleh and M. Teich. "Chapter 5: Electromagnetic Optics" en Fundamentals of Photonics Ann Arbor, 1st ed. MI, USA: Willey 1991, pp. 170 - 171
- [5] B. Saleh and M. Teich. "Chapter 1: Ray Optics" en Fundamentals of Photonics Ann Arbor, 1st ed. MI, USA: Willey, 1991, p. 6
- [6] A. Zajac and E. Hecht. Optics Hudson, 4th ed. NY, USA: Pearson Higher Education, 2003, p. 22
- [7] B. Saleh and M. Teich. "Chapter 6: Polarization and Crystal Optics" en Fundamentals of Photonics Ann Arbor, 1st ed. MI, USA: Willey, 1991, pp. 203 – 309
- [8] ITU-T Recommendation G.640" International Telecommunications Union, ITU-T G-Series Recommendations, pp. 1-6, Mar. 2006.
- [9] H. Hamad "Free Space Optics (FSO) Type Approval Guidance" Telecommunications Regulatory Authority, Guidance No.1 of 2005, Dec. 2005.
- [10] S. Rajagopal "IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support" IEEE Communications Magazine, Volume: 50, Issue: 3, Mar. 2012
- [11] L. Brown, H. LeMay, B. Bursten, J. Burdge. "Capítulo 14: Cinética Química" en Química: La Ciencia Central, 9th ed. México D.F., México: Pearson Education, 2004, p. 532

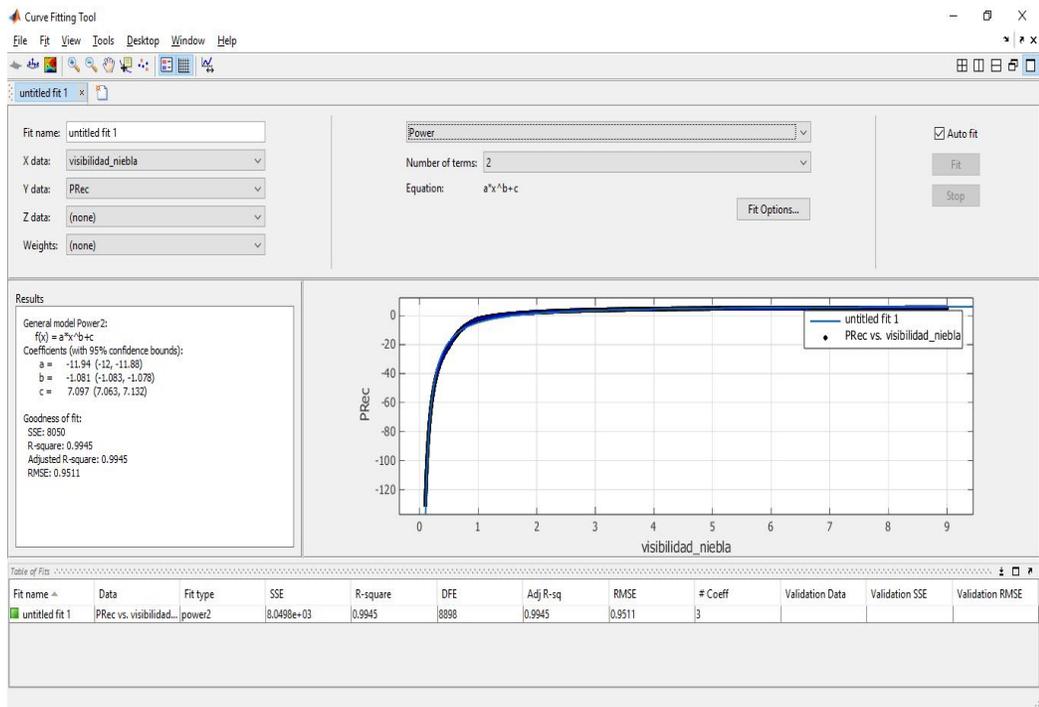
- [12] J. Hubbell and S. Seltzer. "X-Ray Mass Attenuation Coefficients" Radiation Physics Division, PML, NIST, Jul. 2004.
- [13] M. Al Naboulsi and F. De Fornel. "Fog attenuation prediction for Optical and Infrared waves" Optical Engineering, Vol. 43, No. 2, pp. 319-329, Feb. 2004
- [14] B. Saleh and M. Teich. "Chapter 3: Beam Optics" en Fundamentals of Photonics Ann Arbor, 1st ed. MI, USA: Willey, 1991, pp. 81-91
- [15] F. Dominec. (2007, noviembre 4). "Intensity and E-amplitude profile of a gaussian laser beam" [Imagen con licencia Creative Commons Online]. Disponible en: [http:// en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)
- [16] A. Suriza, I. Rafiquil, W. Al-Khateeb and A. Naji, "Analysis of Rain Effect on Terrestrial Free Space Optic Base don Data Meassured on Tropical Climate" IIUM Engineering Journal, Vol. 12, No. 5, pp. 45-51, Mar. 2011
- [17] J. Jassim and A. Kodeary "Experimental Study of the Influence of Aerosol Particles on Range of Free Space Laser Communication System in Iraq" Journal of Applied Electromagnetism vol. 19 No. 2, pp. 28-33, 2013
- [18] E. Ouellet, R. Padjen, A. Pfund, R. Fuller and T. Blankenship. "Chapter 4. Wireless Network Design" en Building a Cisco Wireless LAN Rockland, 1st ed. MA, USA: Syngress Publishing, May. 2002, p. 194
- [19] R. Serway and J. Jewett. "Physics Volume 2", Stamford, 7th ed. CT, USA: Thomson Learning Academic R. Center, 2008, pp. 1077-1079
- [20] J. Olmedo "Boletín Climatológico Anual 2015" Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología No.002, pp. 3-10, 2016
- [21] K. Kashiwagi "HL6545MG" ODE-208-038C (Z) Rev. 3, Feb. 2006, pp. 1-2
- [22] ThorLabs Inc. "L850P010" Thor Labs 11910-S01 Rev. C, Oct. 2010, p. 1
- [23] ThorLabs Inc. "L1550P5DFB" QTN010037-S01 Rev. A, May. 2015, pp. 1-2
- [24] ThorLabs Inc. "LED1550E. Ultra Bright NIR LED" 16392-S01 (Z) Rev. B, Apr. 2009, pp. 2-3

- [25] Hamamatsu Inc. "Photodiode InGaAs APD G8931-04" Hamamatsu Photonics K. K. Solid State Division Catalog No. KAPD1018E03, Jan. 2009, p. 1
- [26] Hamamatsu Inc. "Si PIN Diode S3883" Hamamatsu Photonics K. K. Solid State Division Catalog No. KPIN1044ED6, Nov. 2014, pp. 1-2
- [27] L. Pedrotti, Fundamentals of Photonics Waco, TX, USA: Center for Occupational Research and Development, 2008, p. 105
- [28] R. Carboni (2009, april 3) "Diagram of a simple collimating lens" [Imagen con licencia Creative Commons Online]. Disponible en: [http:// en.wikipedia.org](http://en.wikipedia.org)
- [29] M. A. Ali "Analysis of Data Rate for Free Space Optical Communications System", International Journal of Electronics and Communication Technology Vol. 5, Issue SPL-1, pp. 20-23, Mar. 2014
- [30] J. Anthes "OOK, ASK and FSK Modulation in the Presence of an Interfering signal" Dallas, TX, USA: Application Note, RF Monolythics, 1998, p. 4
- [31] P. Mandl, E. Schrotter, E. Leitgeb, "Hybrid Systems Using DVB-T, WLAN and FSO to Connect Peripheral Regions with Broadband Internet Services", International Conference on Telecommunications, pp. 67 – 71, Mar. 2009
- [32] M. Estrella y A. Panchana, "Estudio de Factibilidad, Diseño del Sistema y Planificación para la Implementación de ESPOL-TV en la Ciudad de Guayaquil, con Puntos de Retransmisión en la Provincia de Santa Elena y el Cantón Playas," Artículo de Tesis de Ingeniería, Facultad de Ingenierías en Electricidad y Computación, ESPOL, Guayaquil, Ecuador, 2014. p. 6
- [33] J. Proaño. (2017, enero 21). Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador [Online]. Disponible en: <https://www.inocar.mil.ec/web/index.php/precipitacion-en-guayaquil>
- [34] R. Correa, "Reglamento a Ley de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial" Quito, Ecuador: Registro Oficial Suplemento 731 del 25 de junio del 2012, p. 60, Jun. 2012

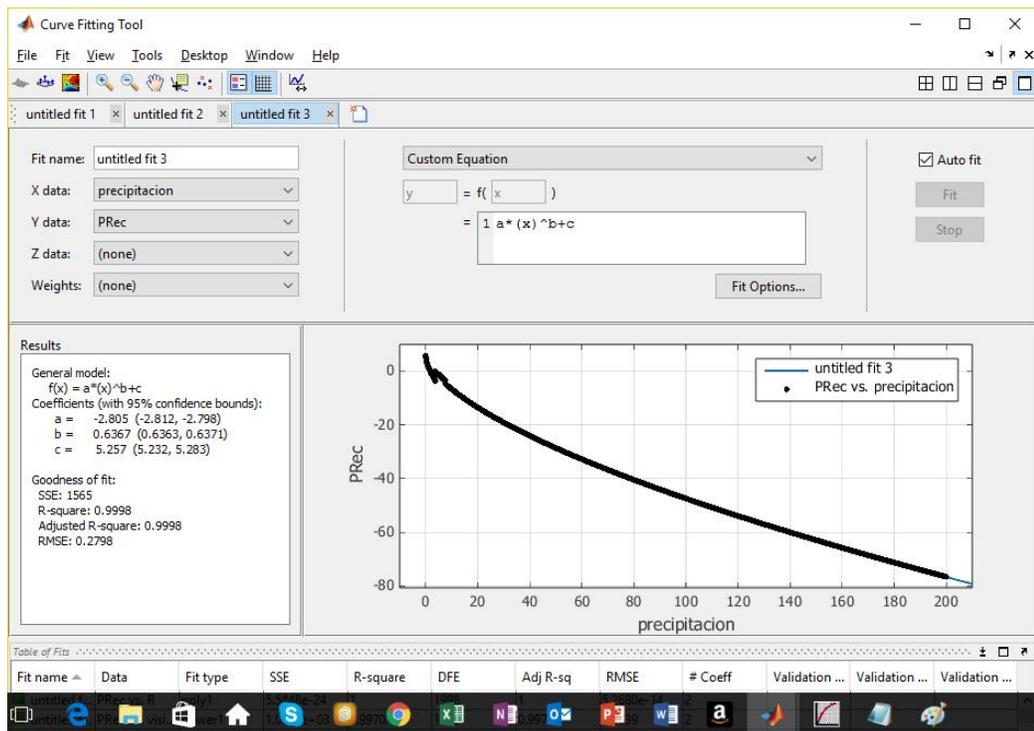
- [35] Z. Ghassemlooy, W. Popoola y S. Rajbhandari, "Optical Wireless Communications: System and Channel Modeling with MATLAB" NY: CRC Press, 2002.
- [36] S. Jaruwatanadilok, U. Ketprom, A. Ishimaru. "Modeling the point-to-point Wireless communication channel under the adverse weather conditions" IEICE Transactions On Electronics 87.9, 2004, pp. 1455 – 1462.
- [37] P. Harboe, J. Souza. "Free Space Optical Communication Systems: A feasibility study for deployment in Brazil" Journal of Microwaves and Optoelectronics, Vol. 3 N° 4, Apr. 2004.
- [38] J. Schuster, H. Willebrand, S. Bloom, E. Korevaar "Understanding the performance of Free Space Optics," Journal of Optical Networking Vol. 2, Issue 6, pp. 178, 2003

ANEXO

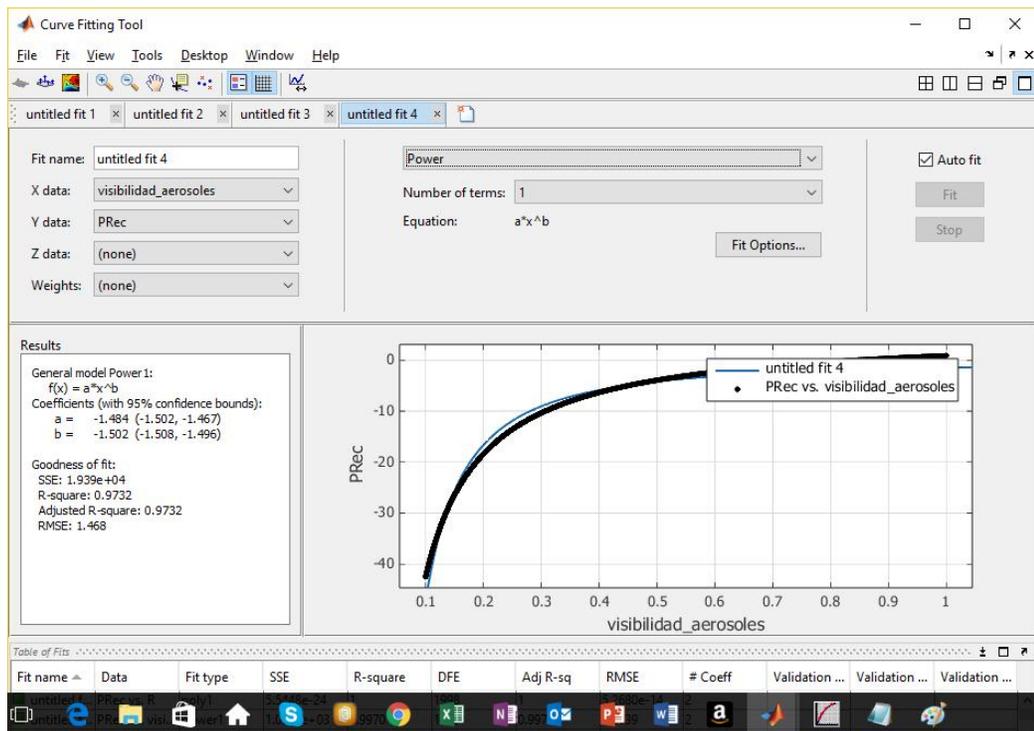
Ajuste de curva para la respuesta del sistema a la visibilidad en la niebla. Para realizarlo se empleó la caja de herramientas 'Curve Fitting Tool' en MATLAB. El gráfico del mismo se observa en la figura 5.7, en la página 32. En este caso, se simuló el sistema teniendo en cuenta únicamente el efecto producido por la niebla. Para el sistema completo, la curva obtenida se ajustará a la misma forma obtenida porque las pérdidas ocasionadas por la niebla son las únicas que dependen de la visibilidad en la niebla.



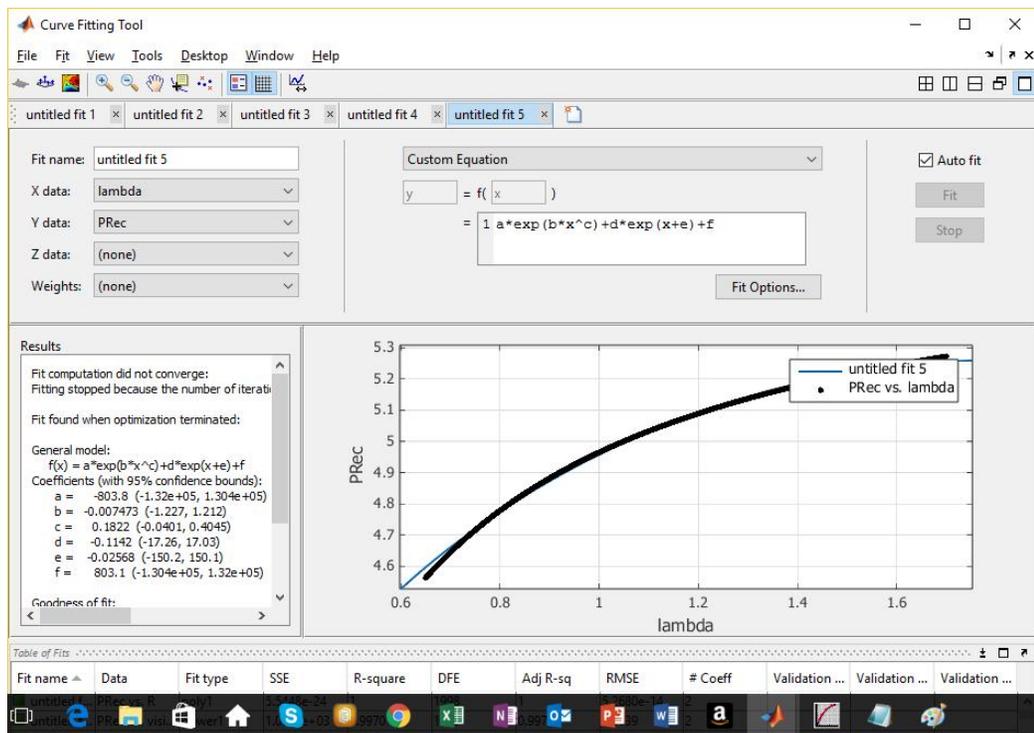
Ajuste de curva para la respuesta del sistema a la precipitación instantánea. Para realizarlo se empleó la caja de herramientas 'Curve Fitting Tool' en MATLAB. El gráfico del mismo se observa en la figura 5.12, en la página 37. En este caso, se simuló el sistema teniendo en cuenta únicamente el efecto producido por la lluvia. Para el sistema completo, la curva obtenida se ajustará a la misma forma obtenida porque las pérdidas ocasionadas por la lluvia son las únicas que dependen de la precipitación instantánea.



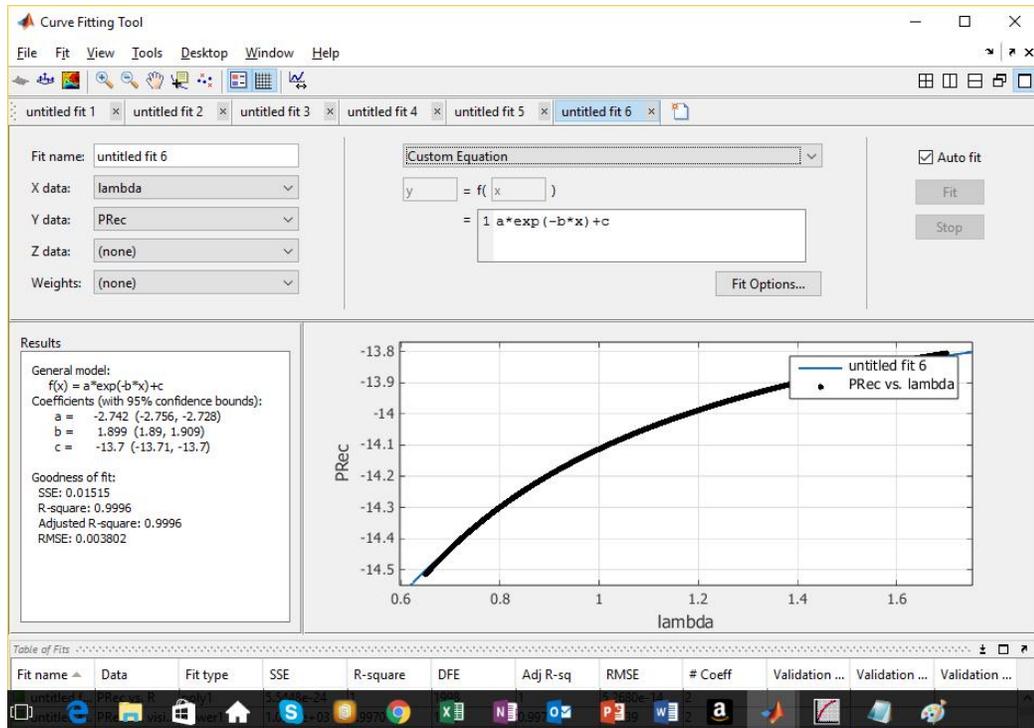
Ajuste de curva para la respuesta del sistema a la visibilidad del aire con polvo y aerosoles. Para realizarlo se empleó la caja de herramientas 'Curve Fitting Tool' en MATLAB. El gráfico del mismo se observa en la figura 5.17, en la página 41. En este caso, se simuló el sistema teniendo en cuenta únicamente el efecto producido el polvo y los aerosoles. Para el sistema completo, la curva obtenida se ajustará a la misma forma obtenida porque las pérdidas ocasionadas por la lluvia son las únicas que dependen de la visibilidad del aire con polvo y aerosoles.



Ajuste de curva para la respuesta del sistema a la longitud de onda del haz de luz emitido. Para realizarlo se empleó la caja de herramientas 'Curve Fitting Tool' en MATLAB. El gráfico del mismo se observa en la figura 5.19, en la página 42. En este caso, se simuló el sistema teniendo en cuenta únicamente el efecto producido el polvo y los aerosoles. En esta ocasión, se simuló el sistema teniendo en cuenta únicamente el efecto del polvo y los aerosoles.



Ajuste de curva para la respuesta del sistema a la longitud de onda del haz de luz emitido. Para realizarlo se empleó la caja de herramientas 'Curve Fitting Tool' en MATLAB. El gráfico del mismo se observa en la figura 5.27, en la página 51. En este caso, se simuló el sistema teniendo en cuenta únicamente el efecto producido el polvo y los aerosoles. En esta ocasión, se simuló el sistema completo.



Modelo matemático de la señal simulada

$$P = P_o \left[\mu(t) - \mu \left(t - (R_1 + R_2)C * \text{Ln} \left(\frac{(R_1 + R_2)I_{min}}{V_{DC}} \right) \right) \right] \left(\frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \right) \left(\int_0^{s_y} \int_0^{s_x} e^{-\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{2 \left(\left(1 + 1E^6 \left(\frac{\text{Tan}(\theta_o/2) \right) \right) \right) \sigma}} dx (\mu(y - \%OBS * s_y)) dy \right) * \dots$$

$$\dots * \left(\frac{10 * AP_r}{(10 * AP_r + 1) * \left(1 + 1E^5 \left(\frac{\text{Tan}(\theta_o/2) \right) \right) \sigma} \right)^2 10^{-\frac{\alpha + ((0.509\mu(-(Precp-3.8)) + 0.365[\mu(Precp-3.8) - \mu(-(Precp-7.6))] + 0.365\mu(Precp-7.6))Precp^{0.63})}{10} R} * \dots$$

$$\dots * e^{-\left(\frac{3.91}{V_{niebla}}\right)\left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q} R} e^{-\left(\frac{3.91}{V_{aerosoles}}\right)\left(\frac{\lambda}{0.55}\right)^{-q'} R} (1 + COLIMACIÓN * (T_{colimadores}^2 - 1))$$

$\sigma = (1 + 1E5 * (\text{divergencia} * R) / \text{apertura}R) * \sigma$;

P_o es la potencia del haz emitido por el elemento emisor de luz en el terminal FSO transmisor (W)

R_1 y R_2 son las resistencias del circuito de soporte del terminal FSO transmisor (ohms)

C es la capacitancia del circuito de soporte del terminal FSO transmisor (F)

I_{min} es la corriente de umbral del elemento emisor de luz (A)

θ_o es el ángulo del haz de luz emitido por el elemento emisor de luz. Toma el valor de 0° cuando se emplean lentes colimadores

λ es la longitud de onda del haz de luz emitido

COLIMACIÓN es una variable booleana que adopta el valor de '1' cuando se emplean lentes colimadores y '0' cuando no se los emplean

V_{DC} es la alimentación de voltaje que recibe el circuito de soporte del terminal FSO transmisor (V)

$c = (x_c, y_c)$ es el centro del haz emitido (mm)

$s = (s_x, s_y)$ es el tamaño de la celda receptora del fotorreceptor (mm)

AP_r es la apertura del fotorreceptor (mm)

σ es el ancho del haz de luz emitido

%OBS es el porcentaje de obstrucción de la zona de Fresnel por parte de obstáculos sólidos (%)

α es el coeficiente de atenuación del aire (dB/km)

Precp es la precipitación instantánea de la lluvia en mm / h

V_{niebla} es la visibilidad en la niebla (km)

$V_{aerosoles}$ es la visibilidad en un ambiente con polvo y/o aerosoles (km)