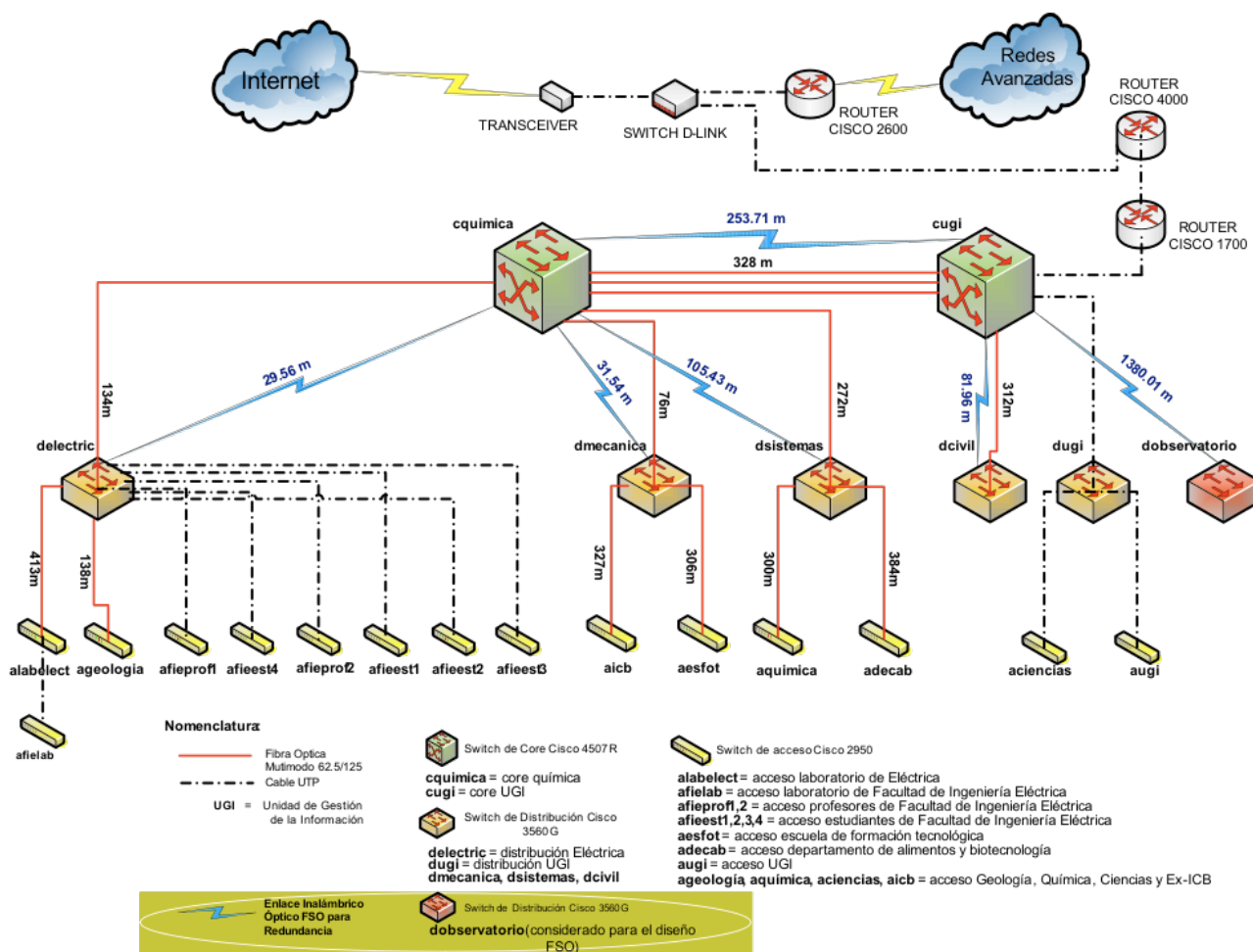


Diseño y Factibilidad de una Red Inalámbrica Óptica utilizando Tecnología FSO para la comunicación entre los edificios de la Escuela Politécnica Nacional y el Observatorio Astronómico.



AUTORES

Ing. Christian Andrés Cuenca Pauta
Ing. Julio César Palacio Pacheco

DIRECTOR

Ing. Fabián Corral, MSc

Junio 2009

Resumen

Las comunicaciones ópticas inalámbricas aparecieron y han sido utilizadas desde hace muchos siglos atrás, y su desarrollo e implementación se han demorado producto del descubrimiento de otras técnicas de transmisión que han sido explotadas e implementadas mayormente como la electricidad por cobre y la fibra óptica.

El descubrimiento del láser semiconductor, la baja atenuación de la fibra óptica, permitieron en un principio desarrollar la comunicación a través de la fibra óptica y luego surgió el interés por la comunicación de haces de luz por el espacio libre, principio de las comunicaciones por espacio libre FSO (*Free Space Optics*).

La capacidad de transmisión de un sistema FSO actualmente es de hasta 2,5 Gbits/s, lo cual lo convierte en un sistema de gran ancho de banda que puede soportar fácilmente fuertes tasas de transferencia de datos, pudiéndose desempeñar como soporte secundario de una red o también como conexión principal de una red (backbone).

Un sistema FSO es de fácil implementación, característica que se traduce en una alternativa de rápido despliegue para una red de backbone.

Las distancias que puede cubrir un enlace FSO están en el rango desde varios metros hasta pocos kilómetros, rango de operación que es relativo y depende de los equipos de transmisión y recepción así como los fenómenos climáticos presentes en el medio de transmisión.

La banda de operación de las comunicaciones ópticas de espacio libre corresponde a la denominada óptica, aproximadamente, desde el ultravioleta hasta la región del infrarrojo.

Este rango coincide con las longitudes de onda usadas en las comunicaciones por fibra óptica.

Los equipos FSO emplean para la transmisión en espacio libre, longitudes de onda que van de los 700 nm hasta los 1500 nm, lo cual significa que el sistema FSO es de alta frecuencia y supera a otros tales como las microondas que operan bajo los 40 GHz.

El principal problema del medio de transmisión en las comunicaciones inalámbricas ópticas de espacio libre es la neblina, la misma que debido a su consistencia (pequeñas gotas de agua de diámetro similar a la longitud de onda de la señal enviada), puede atenuar la potencia de la señal y dificultar la comunicación.

Los valores de atenuación molecular producto de la neblina, se incrementan de acuerdo a la distancia que recorren los enlaces inalámbricos ópticos; y están en relación del coeficiente de dispersión, el mismo que depende de las condiciones climáticas del sector en el que se quiera establecer el sistema FSO.

Otros valores considerables de pérdidas corresponden a las atenuaciones geométricas, relacionadas con la distancia del enlace, divergencia del haz y área de captura del receptor.

Existen otros valores de pérdidas (correspondientes a las pérdidas en conectores, equipos FSO, fibra óptica y desalineamiento), los cuales son pequeños y no afectan de manera sensible la disponibilidad de los enlaces diseñados.

Una característica importante de los sistemas FSO es la transparencia de protocolo, es decir que puede enviar cualquier tipo de trama independientemente del protocolo que ma-

nejen; esta facilidad logra que la tecnología FSO se acople a los equipos de red existentes sin necesidad de realizar cambios en los equipos instalados, o en los protocolos usados para la información.

La topología actual de la red de la EPN es de estrella extendida, a esta misma topología se ha adoptado los enlaces inalámbricos ópticos; con esto se puede usar los elementos activos de la Polired (switches de core y distribución) para el funcionamiento del sistema FSO.

La red cableada de la Escuela Politécnica Nacional sigue un esquema jerárquico de tres niveles (core, distribución y acceso); en el presente diseño se ha seguido dicho esquema emulando los enlaces de modo que se pueda obtener una red de redundancia con enlaces FSO.

Los enlaces inalámbricos ópticos se han diseñado entre los niveles de core y distribución, esto por cuanto no se justifica establecer enlaces hasta el nivel de acceso por consideraciones físicas y técnicas, que tiene que ver con que varios switches de acceso se encuentren dentro de un mismo edificio o que el tráfico que cursan no sea representativo.

La conexión entre la Polired y la red del Observatorio Astronómico, requiere de una torre de 30 metros de altura que proporcione la línea de vista necesaria entre el edificio de Administración General (que en su 1er piso tiene el funcionamiento de la Unidad de Gestión de la Información "UGI" que administra la red) y el Observatorio.

El costo resultante de la red FSO es comparable con el costo de implementación de una red de fibra óptica, si bien los equipos FSO son moderadamente costosos, presentan grandes ventajas por la facilidad de instalación y acceso en ubicaciones difíciles.

Diseño

Distancias de los Enlaces y existencia de Línea de Vista

Dentro del campus de la Escuela Politécnica Nacional y el Observatorio Astronómico, se realizaron mediciones con ayuda de un equipo de posicionamiento global para calcular distancias con el menor error posible entre los futuros nodos de interconexión inalámbricos ópticos.

Los valores tabulados de las coordenadas geográficas, alturas y el nivel de referencia de los edificios a interconectarse, se presentan en la tabla 3.1

EDIFICIO	ALTURA [metros]	NIVEL DE REFERENCIA [metros sobre nivel mar msn]
ELÉCTRICA-QUÍMICA	37,5	2803,10
SISTEMAS	21,0	2799,00
ELÉCTRICA (ANTIGUO)	16,4	2803,10
MECÁNICA	15,3	2803,10
ADMINISTRACIÓN (Centro de Computo)	41,0	2801,00
CIVIL	28,5	2807,00
OBSERVATORIO (PARQUE ALAMEDA)	12,0	2818,05

Tabla 3.1 Datos de edificios considerados en el diseño

Determinar las distancias reales que recorrerán las señales inalámbricas ópticas, requirió de cálculos adicionales que consideren los valores de los niveles de referencia topográficos obtenidos del mapa de nivel topográfico, y de las alturas de los edificios.

La siguiente figura muestra de forma esquemática un enlace inalámbrico óptico entre dos sitios. Se muestra detalles como la diferencia de nivel topográfico, las alturas de los edificios, la distancia horizontal y la distancia del enlace.

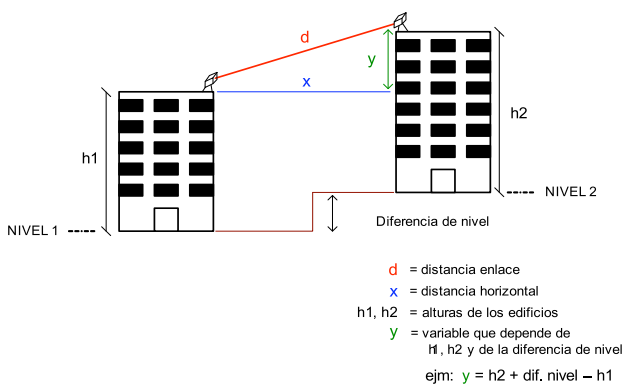


Figura 1. Distancias de los enlaces inalámbricos ópticos

Enlace Unidad de Gestión de la Información_UGI (switch de core) y Observatorio Astronómico

Este enlace tiene la particularidad de no presentar línea de vista entre ambos puntos, entendiendo a un enlace con línea de vista como un camino limpio, sin obstrucciones físicas entre el transmisor y receptor.



Figura 2. Observatorio Astronómico y Edificio de Administración (EPN), fuente google earth

En la siguiente figura se puede observar que no existe línea de vista con el Observatorio Astronómico.



Figura 3. Foto tomada desde el Edificio de Administración (EPN) hacia el Observatorio

De acuerdo a los datos obtenidos se tiene el siguiente esquema:

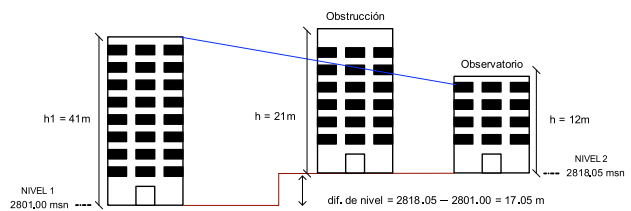


Figura 4. Esquema explicativo

La altura del edificio que obstruye la línea de vista entre el edificio de Administración General y el Observatorio Astronómico, es de 21 metros, por esta razón se considera una torre de 30 metros de altura para superar dicha obstrucción. Entonces se realizan los cálculos teniendo en cuenta el nuevo esquema:

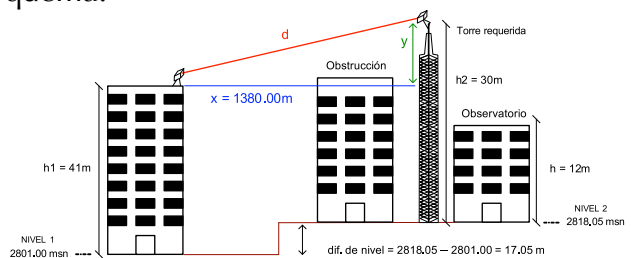


Figura 5. Esquema detalle de la torre

La distancia real del enlace, distancia que recorrerá el haz óptico, es de 1,38 kilómetros.

Distancias Reales de los Enlaces Inalámbricos Ópticos

ENLACE		DISTANCIA (metros)
switch core UGI	switch core química	253,71
	switch distribución civil	81,96
	switch distribución observatorio	1380,01
switch core química	switch distribución sistemas	105,43
	switch distribución eléctrica	29,56
	switch distribución mecánica	31,54

Con excepción del enlace al Observatorio Astronómico, que para presentar línea de vista se ha considerado una torre de 30 metros; todos los enlaces propuestos para el diseño cumplen con dicho requerimiento, haciendo nuevamente a la tecnología FSO una alternativa válida.

CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS FSO

Análisis

Las características de los sistemas FSO serán evaluadas a través del margen del enlace o link margin, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$M_{link} = Pe + |Sr| - Aff_{Geo} - Aff_{Atm} - P_{Sist} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

M_{link} es el margen del enlace o link margin

Pe es la potencia de emisión de la señal (dBm)

Sr es la sensibilidad del receptor (dBm)

Aff_{Geo} es la atenuación geométrica del enlace (dB)

Aff_{Atm} es la atenuación atmosférica del enlace afectada principalmente por la niebla (dB)

P_{Sist} son las pérdidas del equipo, conectores, fibra óptica y desalineamiento (dB)

Potencia de emisión de la señal y Sensibilidad del Receptor

Los datos de la potencia de emisión de la señal y la sensibilidad del receptor son proporcionados por el fabricante de los equipos FSO.

Dentro del campus de la Escuela Politécnica Nacional, para los enlaces inalámbricos ópticos entre los switches de core y distribución, se empleará el equipo de la tecnología FSO de marca SONABEAM modelo 1250-M; cuya potencia de emisión y sensibilidad son:

$$Pe = 140mW$$

$$Sr = -20dBm$$

Este equipo es de características multihaz, lo que permite disminuir considerablemente efectos como la dispersión atmosférica, para el caso del modelo 1250-M se tiene 4 haces; lo que resultaría en la siguiente potencia de

emisión:

$$Pe = 4 \times 140mW$$

$$Pe = 560mW = 27.48dBm$$

Para el enlace inalámbrico óptico entre el edificio de Administración y el Observatorio Astronómico se empleará el equipo de la tecnología FSO de marca SONABEAM modelo 155-M (ver anexos), cuya potencia de emisión y sensibilidad son:

$$Pe = 640mW$$

$$Sr = -31dBm = 28.06dBm$$

Atenuación Geométrica

El haz emitido por el transmisor sufrirá divergencia, de esta manera la celda receptora recibirá únicamente una fracción de la energía emitida.

La atenuación geométrica se describe de acuerdo a la ecuación 3.3.

$$Aff_{geométrica} = \frac{S_d}{S_{captura}} = \frac{\frac{\pi}{4}(d\theta)^2}{S_{captura}} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

θ es la divergencia del haz (miliadianes = mrad)

d es la distancia que recorre el haz (metros = m)

$S_{captura}$ es el área de captura del receptor (metros cuadrados = m^2)

S_d es el área del haz a una distancia (d)

Como se observa, la atenuación geométrica está en función de la divergencia del haz, la distancia y el área de captura.

El valor de la divergencia del haz considerado para el diseño de los enlaces inalámbricos ópticos es 3 miliadianes. (valor estimado tomando en cuenta que es el máximo posible de acuerdo a las características de los enlaces), esto porque los diseños deben ser siempre realizados tomando en considera-

ción las peores condiciones, para que de esta manera el funcionamiento del sistema diseñado sea óptimo en las condiciones normales de funcionamiento.

El área de captura, dato estándar de los fabricantes de equipos FSO, es de 0,025 metros cuadrados, valor con el que se realizan los cálculos.

Basados en las precedentes fórmulas se calculan los valores de la atenuación geométrica para los enlaces inalámbricos ópticos. Los resultados se muestran en la tabla 3.2.

ENLACE	DISTANCIA (metros)	DIVERGENCIA (radianes)	ÁREA DE CAPTURA (metros cuadrados)	ÁREA GEOMÉTRICA	ATENUACIÓN GEOMÉTRICA (dB)
cugi - química	253,71	0,003	0,025	18,19984	12,601
cugi - dcivil	81,96	0,003	0,025	1,899312	2,786
cquímica - dsistemas	105,43	0,003	0,025	3,142829	4,973
cquímica - deléctrica	29,56	0,003	0,025	0,247059	-6,072 ≈0
cquímica - dmecánica	31,54	0,003	0,025	0,281265	-5,509 ≈0
cugi - dobservatorio	1380,01	0,003	0,025	538,4642	27,312

Tabla 3.2 Atenuación Geométrica de los Enlaces

La atenuación geométrica es un factor que limita la distancia del enlace inalámbrico óptico y puede reducir la disponibilidad del sistema, su valor será mayor en relación a cuan menor sea el área del receptor y a la distancia que tendrá que recorrer el haz de información.

Atenuación Atmosférica por Niebla

La atenuación atmosférica es descrita por la ley de Beer, la misma que puede ser expresada en función de la transmitancia.

La ley de Beer es una relación empírica que relaciona la absorción de la luz con las propiedades del material atravesado; en resumen, la ley explica que hay una relación exponencial entre la transmisión de luz a través de una sustancia y la concentración de la sustancia. Se expresa de acuerdo a la ecuación 3.5.

$$\frac{P(d)}{P(0)} = e^{-\sigma \cdot d} \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde:

- $P(d)$ es la potencia de la señal a una distancia "d" del transmisor
- $P(0)$ es la potencia emitida
- e es la relación exponencial
- σ es el coeficiente de atenuación
- d es la distancia que recorre el haz (kilómetros)

El valor del coeficiente de absorción varía según el material absorbente.

La transmitancia óptica se define como la fracción de luz incidente, a una longitud de onda específica que pasa a través de un material; se expresa de acuerdo a la ecuación 3.6.

$$\tau(d) = \frac{P(d)}{P(0)} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Donde:

- $\tau(d)$ es la transmitancia a una distancia "d" del transmisor
- $P(d)$ es la potencia de la señal a una distancia "d" del transmisor
- $P(0)$ es la potencia emitida

Finalmente, se relaciona la ley de Beer y la transmitancia, ecuación 3.5 y 3.6 respectivamente; igualando sus expresiones en la ecuación 3.7.

$$\tau(d) = \frac{P(d)}{P(0)} = e^{-\sigma \cdot d} \quad \text{Ecuación 3.7}$$

La atenuación atmosférica se relaciona con la transmitancia de acuerdo a la ecuación 3.8.

$$Aff_{Atm(dB)} = 10 * \log(1/\tau(d)) \quad \text{Ecuación 3.8}$$

El coeficiente de atenuación es la suma de cuatro términos, representados en la ecuación 3.9.

$$\sigma = \alpha_m + \alpha_n + \beta_m + \beta_n \quad \text{Ecuación 3.9}$$

Donde:

- α_m es el coeficiente de absorción molecular
- α_n es el coeficiente de absorción del aerosol
- β_m es el coeficiente de dispersión de Rayleigh
- β_n es el coeficiente de dispersión de Mie

Los coeficientes de absorción son resultado de la absorción de energía que hace el medio (atmósfera) y ciertas partículas.

El coeficiente de dispersión de Rayleigh, β_m , es el resultado de la interacción de la luz con partículas de tamaño pequeño en relación a la longitud de onda.

El coeficiente de dispersión de Mie, β_n , aparece cuando las partículas incidentes son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la onda transmitida.

Tomando en cuenta las características de los sistemas FSO:

- Las longitudes de onda de interés se encuentran entre 780 nm y 1550 nm
- Los coeficientes de absorción molecular, aerosol y dispersión Rayleigh son despreciables

Resulta entonces que el coeficiente de atenuación es dominado por la dispersión de

Mie que, a su vez, está en función de la visibilidad.

Por lo tanto, en las longitudes de onda de interés el coeficiente de atenuación es descrito por la ecuación 3.10.

$$\sigma = \beta_n \quad \text{Ecuación 3.10}$$

La visibilidad es técnicamente definida como la distancia en la cual la intensidad de luz decrece a 2% de su valor inicial. Cualitativamente, la visibilidad es la máxima distancia en la cual aún es posible distinguir un objeto oscuro en el horizonte.

CONDICIONES AMBIENTALES	PRECIPITACIÓN		VISIBILIDAD [m]	
		mm/hr		
Niebla muy Espesa			0 m	
			50 m	
Niebla Espesa			500 m	
			600 m	
	Tormenta	100	770 m	
			1 Km	
Niebla Moderada	Nieve	Lluvia Fuerte	25	1,9 Km
				2 Km
		Lluvia Moderada	12,5	2,8 Km
				4 Km
Neblina		Lluvia Ligera	2,5	5,9 Km
				10 Km
Despejado		Llovizna	0,25	18,1 Km
				20 Km
Muy Despejado				23 Km
				50 Km

Tabla 3.3 Valores de Visibilidad

La variación del coeficiente de atenuación con la visibilidad es descrita mediante la ley de Kruse, de acuerdo a la ecuación 3.11.

$$\sigma = \beta_n = \frac{3.912}{V} \left(\frac{\lambda_{nm}}{550} \right)^{-q} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

$$\sigma = \beta_n = \frac{3,912}{0,77} \left(\frac{1550}{550} \right)^{-0,27}$$

$$\sigma = \beta_n = 3,84$$

Con:

$$q = \begin{cases} 1,6 & \text{si } V > 50km \\ 1,3 & \text{si } 6km < V < 50km \\ 0,16 * V + 0,34 & \text{si } 1km < V < 6km \\ V - 0,5 & \text{si } 0,5km < V < 1km \end{cases}$$

Donde:

V es la visibilidad en kilómetros

λ_{nm} es la longitud de onda en nanómetros

q es la dispersión de la partícula en el medio

El factor q que depende de la dispersión de la partícula en el medio es proporcional y referente a ciertos rangos de visibilidad.

Considerando el peor de los escenarios climáticos que pudieran presentarse en Quito, el cual contempla la presencia de una lluvia torrencial y niebla al mismo tiempo, el valor promedio de visibilidad es de 770 metros, según la tabla descrita anteriormente.

La longitud de onda a la que operan los equipos FSO en el espacio libre es 1.550 nm.

Considerando la longitud de onda de operación y la visibilidad típica de Quito.

$$\lambda_{nm} = 1.550 \text{ nm}$$

$$V = 770 \text{ m} = 0,77 \text{ km}$$

$$q = V - 0,5 = 0,77 - 0,5 = 0,27$$

Y aplicando la ecuación 3.11, se calcula el coeficiente de atenuación para los enlaces inalámbricos ópticos en las peores condiciones.

Con este valor se puede emplear la ley de Beer y calcular la transmitancia para los enlaces inalámbricos ópticos.

De esta manera se calculan los valores de la atenuación atmosférica producida por la neblina, para los distintos enlaces dentro del campus de la Escuela Politécnica Nacional, y también para con el Observatorio Astronómico; resultados que se muestran en la tabla 3.4.

ENLACE	DISTANCIA (metros)	COEFICIENTE DE ATENUACIÓN	TRANSMITANCIA	ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA (dB)
cugi - química	253,71	3,84	0,37747671	4,23109836
cugi - dcivil	81,96	3,84	0,72998857	1,36683939
cquímica - dsistemas	105,43	3,84	0,66707606	1,75824642
cquímica - deléctrica	29,56	3,84	0,89269491	0,4929694
cquímica - dmecánica	31,54	3,84	0,88593331	0,52598968
cugi - dobservatorio	1380,01	3,84	0,0049954	23,0143

Tabla 3.4 Atenuación Atmosférica por Niebla

De igual manera, que la atenuación geométrica, la atenuación atmosférica limita la distancia del enlace y puede reducir la disponibilidad del sistema de acuerdo a sus valores. Observamos en los valores de los datos obtenidos en la tabla anterior, que la atenuación atmosférica se incrementa proporcionalmente con la distancia que tiene que recorrer el haz por el medio inalámbrico óptico.

Pérdidas del Sistema

Pérdidas de Equipos

Estos valores surgen de factores intrínsecos en los elementos electrónicos que componen los equipos FSO. Esta consideración además del hecho de que con el tiempo todos los equipos electrónicos sufren desgaste y cambio en sus propiedades de funcionamiento; exige que se considere un valor de reserva para adoptar la situación real. El dato de pérdida de un equipo FSO es dado por el fabricante.

Pérdidas en Conectores

Los conectores son elementos pasivos que unen la fibra óptica con los puertos respectivos en los switches de core y distribución.

Las pérdidas de conectores, son en general valores bajos y son proporcionados por los fabricantes.

Establecer un enlace FSO con los equipos ubicados en las terrazas de los edificios correspondientes requiere de un conector hacia la parte posterior del switch de core o distribución. De esta manera se tiene por enlace dos conectores, lo cual introduce un valor de pérdidas bastante bajo.

Pérdidas en Fibra Óptica

Las pérdidas en la fibra óptica monomodo y/o multimodo son directamente proporcionales con la distancia de la misma. Su valor oscila entre 5 y 10 dB por kilómetro.

Estas pérdidas son despreciables para nuestros enlaces, puesto que los tramos de fibra óptica que se necesitan para la conexión de los equipos FSO y los switches de core o distribución son bastante cortos.

Pérdidas por Desalineamiento

Esta clase de pérdidas se producen por un desalineamiento o desapuntamiento entre los equipos FSO.

Cuando las haces no se encuentran perfectamente alineados se genera un margen de pérdida en la recepción de la señal, que se conoce como pérdida por desalineamiento.

El desalineamiento debe ser considerado en el diseño, puesto que existe la posibilidad de que ocurran errores en la instalación o por efectos externos como vientos, golpes, oscilación de la estructura de soporte, etc.

Pérdidas del Sistema

Las pérdidas del sistema son el resultado de la suma de las pérdidas de los equipos FSO, los conectores de fibra óptica, los tramos de fibra óptica y el desalineamiento en el montaje de los equipos.

Estos valores se presentan en conjunto en la tabla 3.5

ENLACE	PÉRDIDAS DE EQUIPOS (dB)	PÉRDIDAS EN CONECTORES (dB)	PÉRDIDAS DE FIBRA ÓPTICA (dB)	PÉRDIDAS POR DESALINEAMIENTO (dB)	PÉRDIDAS DEL SISTEMA (dB)
cugi - cqímica	1	1	0	1	3
cugi - dcivil	1	1	0	1	3
cqímica - dsistemas	1	1	0	1	3
cqímica - deléctrica	1	1	0	1	3
cqímica - dmecánica	1	1	0	1	3
cugi - dobservatorio	1	1	0	2	4

Tabla 3.5 Pérdidas del Sistema

Margen de Enlace o Link Margin

Se calcula en base a la ecuación 3.1 anteriormente mencionada.

La tabla 3.6 presenta los parámetros calculados para los enlaces.

	ENLACE 1	ENLACE 2	ENLACE 3	ENLACE 4	ENLACE 5	ENLACE 6
	cugi - quí- mica	cugi - dcivil	cquími- ca - dsiste- mas	cquími- ca - deléc- trica	cquími- ca - dmecá- nica	cugi - dob- serva- torio
Distancia (metros)	253,71	81,96	105,43	29,56	31,54	1380,01
Potencia de Emisión (dBm)	27,48	27,48	27,48	27,48	27,48	28,06
Sensibilidad (dBm)	-20	-20	-20	-20	-20	-31
Atenuación Geométrica (dB)	12,60	2,79	4,97	0	0	27,31
Atenuación Molecular (dB)	4,231	1,366	1,758	0,4929	0,5259	23,0143
Pérdidas del Sistema (dB)	3	3	3	3	3	4
MARGEN DE ENLACE (dB)	27,65	40,33	37,75	43,99	43,95	4,74

Tabla 3.6 Parámetros de los enlaces

ESQUEMA DE RED PROPUESTO

Una vez realizado el análisis del margen de enlace, tomando en cuenta todas las consideraciones de diseño mencionadas; se puede presentar un esquema físico y lógico de los enlaces inalámbricos ópticos propuestos para la Polired y para el Observatorio Astronómico. Ver figura 6.

Resultados

Luego de realizado el diseño de los enlaces inalámbricos ópticos se obtuvo los siguientes resultados:

1. La distancia mínima de los enlaces inalámbricos ópticos es de 29,56 metros referente a la distancia de espacio libre entre las terrazas de los edificios de Eléctrica – Química y Eléctrica antiguo.
2. La mayor distancia de espacio libre que se debe cubrir es aquella entre la terraza del edificio de Administración General en el campus de la Escuela Politécnica Nacional con una torre en el Observatorio Astronómico situado en el parque la Alameda, esta distancia es 1.380,01 metros.

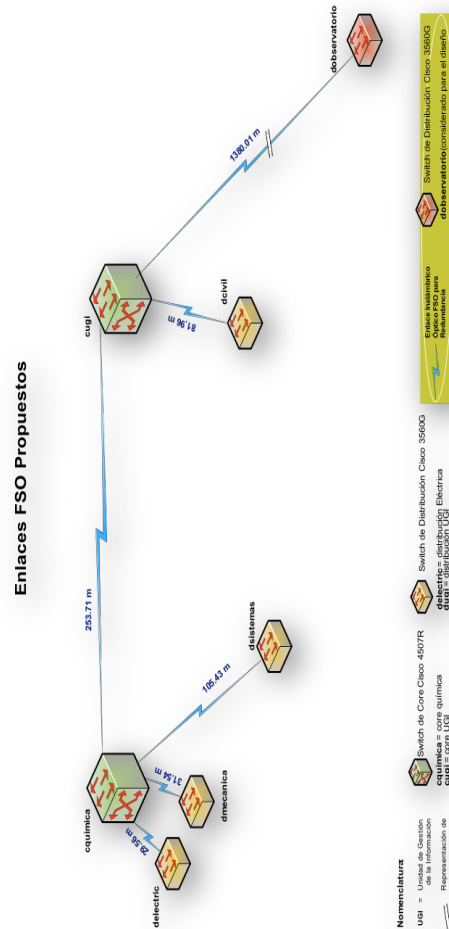


Figura 6. Esquema de Red Propuesto

3. Los equipos FSO empleados en el diseño del presente proyecto de titulación (SONABEAM Serie: 1250-M y 155-M) usan para la transmisión en espacio libre valores de frecuencias del orden de los Terahertz (10^{12} Hz). Una longitud de onda de 850 nm corresponde a una frecuencia de 353 THz; mientras que la de 1550 nm alcanza los 193 THz.
4. La ITU -T, en la actualidad no contempla ninguna regulación con respecto al uso de los sistemas FSO, sin embargo, se están realizando estudios dentro de los grupos de trabajos que participan en las WRC (World Radio Conferences – Conferencias Mundiales de Radio) para contemplar una posible regulación en el uso del espectro electromagnético sobre los 3.000 GHz.

5. La seguridad de la información transmitida por el aire (medio de transmisión en los sistemas inalámbricos ópticos), es excelente, ya que los haces de transmisión son muy estrechos (típicamente mucho menores que 0,5 grados) a diferencia de los haces que presentan los enlaces de microondas cuyos valores están entre los 5 y 25 grados.
6. Los valores de divergencia que se producen se encuentran dentro del rango entre 1 y 3 miliradianes, lo que supone un aumento del diámetro del haz de aproximadamente 1 mm/m, lo cual significa que a una distancia de 1 km, el haz se abrirá entre 1 m y 3 m respectivamente.
7. El diámetro pequeño del haz, que típicamente es sólo de unos metros, es una de las razones por la que es difícil de interceptar los datos en el camino de comunicación de un sistema inalámbrico óptico basado en FSO.
8. La interceptación directa de un haz inalámbrico óptico entre dos sitios remotos de red es prácticamente imposible, debido al hecho que el haz de transmisión es invisible y que cualquier esfuerzo por bloquear el haz tendría que ocurrir cerca de los puntos terminales del equipo inalámbrico óptico.
9. El máximo valor de atenuación por neblina (atenuación molecular) corresponde a 23,0143 dB para el enlace propuesto entre los edificios del Observatorio Astronómico y Administración General, este valor de atenuación molecular es directamente proporcional con la distancia que recorre el enlace mencionado.
10. El presente trabajo, consideró el diseño de los enlaces inalámbricos ópticos, en las peores condiciones ambientales que se puedan presentar, éstas son la posibilidad de tener lluvia torrencial y niebla densa al mismo tiempo, lo que permitiría una visibilidad de hasta 770 metros.
11. Las pérdidas correspondientes a las atenuaciones moleculares por neblina, llegan a valores entre 4,23 dB hasta 23,01 dB.
12. Los enlaces del sistema FSO que se diseñan en el presente trabajo, consideran la máxima divergencia del haz (3 miliradianes) y el área de captura estándar de los equipos FSO (0,025 metros cuadrados). Estos datos producen valores de atenuación geométrica entre 0 dB y 27,31 dB, correspondientes a los enlaces de menor distancia (química – eléctrica y química – mecánica) y mayor distancia (cugí – observatorio) respectivamente.
13. El margen de enlace o link margin, valor que permite conocer si un enlace es factible de realizar, fluctúa entre 43,99 dB y 4,74 dB.
14. A nivel lógico, la red del Observatorio Astronómico necesita contar con un dispositivo de conmutación que se rija a la actual jerarquización de la Polired; se ha visto conveniente la adquisición de un switch Cisco Catalyst 3560G para que desempeñe las funciones de un nivel de distribución.
15. Los enlaces redundantes para la Polired (conexión entre switches de core y switches de distribución) y el enlace adicional para con el Observatorio Astronómico (contemplando la inclusión de una torre de 30 metros y un switch de distribución Cisco Catalyst 3560G) tienen un costo total aproximado de \$ 83.046,48 incluido el costo de instalación y mano de obra.
16. Este valor se ha comparado con una propuesta presentada al UGI para el diseño de un anillo de fibra óptica para la red de la EPN, y la conexión con el Observatorio Astronómico por fibra óptica tendida por los postes de alumbrado público; valor aproximado de \$ 76.563,44.
17. La diferencia en costos entre la solución propuesta por los enlaces FSO y la presentada al UGI por fibra óptica es de \$ 6.483,04. Cantidad que no representa un valor considerable, razón por la que la diferencia de costo no presenta una desventaja para los enlaces inalámbricos ópticos presentados en el presente trabajo, ya que esta propuesta considera los costos de implementación de una torre y la

adquisición adicional de un switch de distribución marca Cisco.

18. Por supuesto, no hay que olvidar que la solución de un anillo de fibra óptica redundante para la EPN, y la interconexión con el Observatorio Astronómico por medio de un tendido de fibra óptica a través del uso de los postes de alumbrado público; no contempla el costo adicional del pago de permisos para el uso de los postes mencionados, ni tampoco la adquisición de elementos activos adicionales de conmutación como el switch de distribución marca Cisco modelo 3560G.

Referencias Bibliográficas

* Olivier BOUCHET, Hervé SIZUN, Christian BOISROBERT, Frédérique DE FORNEL, Pierre-Noel FAVENNEC, "FREE SPACE OPTICS: PROPAGATION AND COMMUNICATION", ISTE, Gran Bretaña y Estados Unidos 2006.

* Heinz WILLEBRAND, Baksheesh GHUMAN, "FREE SPACE OPTICS: ENABLING OPTICAL CONNECTIVITY IN TODAY'S NETWORKS", Sams Publishing, Estados Unidos, 2002.

* Ing. Fabián Corral, "APUNTES DE LA MATERIA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2006.

Biografías

Christian Andrés Cuenca Pauta

nació el 10 de Octubre de 1982 en la ciudad de Quito. Sus estudios primarios los realizó en la Escuela "La Salle". Mientras que sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Aeronáutico de Aviación de Civil "COTAC". Se incorporó de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en Abril del 2008. Ha realizado los cursos CCNA y Linux. Actualmente trabaja en EcuadorVoice NET S.A.



Julio César Palacio Pacheco nació el 9 de Julio de 1982 en la ciudad de Esmeraldas. Realizó sus estudios secundarios en el colegio Sagrado Corazón, obteniendo el título de bachiller en Físico Matemático. Sus estudios universitarios los realizó en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones en 2008. Ha cursado los cursos de Linux, Inglés y actualmente CCNA.



Fabián Vinicio Corral Carrera,

ecuatoriano. Ingeniero en electrónica y telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional. (1989). Magister en ciencias de la ingeniería, con especialización en telecomunicaciones por fibra óptica, en la Universidad de Santiago de Chile. (1994 - 1996). Diplomado en Administración de Telecomunicaciones (Telecommunications Management) en Inglaterra. (1999).



Cursos de especialización en México, Israel, Alemania y Japón. 21 años de experiencia en el sector de telecomunicaciones.

Profesor de Postgrado, de la Escuela Politécnica Nacional, en la Maestría en Conectividad y Redes. Materias: Redes de Banda Ancha; Mercados y Servicios de Telecomunicaciones; Sistemas de Comunicaciones Ópticas. (2001-2008). Profesor de la cátedra Comunicaciones Ópticas, de la Escuela Politécnica Nacional, en la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones. (2006 - 2008).

Actual Asesor Técnico del Consejo Nacional de Telecomunicaciones, CONATEL.