

ENLACE DE FIBRA ÓPTICA DE TRAYECTO LARGO ENTRE LAS CIUDADES DE BOGOTÁ Y CÚCUTA

TRABAJO DE GRADO ESPECIALIZACIÓN EN TELECOMUNICACIONES MÓVILES

*Jaime Andrés Molina Rodríguez
Especialización en Telecomunicaciones Móviles
Bogotá, Colombia
2018*

jamolinar@correo.udistrital.edu.co

RESUMEN: *En el presente artículo se expone el diseño detallado de un enlace de trayecto largo de fibra óptica, específicamente entre las ciudades colombianas de Bogotá y Cúcuta. El diseño comprende un análisis de las características básicas iniciales como lo son las rutas físicas, las rutas lógicas y el plan de frecuencias, para después continuar con la elección inicial de dispositivos y elementos ópticos que permiten sentar las bases de los cálculos de presupuesto de potencia y de presupuesto de ancho de banda.*

Una vez finalizado el diseño, se presenta la simulación del enlace de fibra óptica, fijando la atención tanto en los resultados de las potencias recibidas por intervalos, así como en los análisis del BER final y el respectivo diagrama de ojo, con el fin de corroborar el planteamiento teórico.

ABSTRACT: *This article presents a detailed design of a fiber optic long-path network, between two colombian cities: Bogotá and Cúcuta. The design includes an analysis of basic initial characteristics such as physical routes, logical routes and the frequency plan, and then to continue with the initial choice of optical devices and elements that allow laying the basis of power and bandwidth calculations.*

Once the design is finished, the simulation of the fiber optic link is presented, fixing the attention both on the results of the powers received at intervals, as well as on the analysis of the final BER and the respective eye diagram, in order to corroborate the theoretical approach.

TÉRMINOS RELEVANTES: *Fibra óptica, red óptica, potencia, ancho de banda, dispersión, BER.*

KEYWORDS: *Optical fiber, optical network, power, bandwidth, dispersion, BER.*

INTRODUCCIÓN

Las redes de fibra óptica son, en la actualidad, el medio de transmisión usado por excelencia para comunicar enlaces de larga distancia que manejen anchos de banda significativos. La fibra óptica posee cualidades muy codiciadas en el ámbito de las telecomunicaciones, por mencionar algunas de ellas tenemos la capacidad de transmisión de alta de velocidad, su flexibilidad, su larga vida útil y su inmunidad a las interferencias electromagnéticas. En la actualidad en Colombia ya se han desplegado 19000 Km de fibra óptica y los operadores de telecomunicaciones siguen buscando la expansión de dicha cobertura junto con el aumento de la velocidad de transmisión, empujados por el incremento del número de dispositivos inteligentes en los hogares, así como el número de servicios interactivos en el mercado. Estas son algunas de las razones por las cuales es de vital importancia para un especialista en telecomunicaciones móviles conocer el diseño de una red de fibra óptica de largo alcance, explorando cada uno de los elementos que conforma la arquitectura de la red, las consideraciones de diseño frente a los requerimientos y la comparación de la teoría frente a la implementación, a través de simulaciones.

I. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un Enlace de trayecto largo por Fibra óptica, que permita el envío de información entre las ciudades de Bogotá y Cúcuta.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar una ruta física adecuada para el enlace de fibra óptica.
- Definir puntos importantes del enlace, como lo son los nodos en donde se van a extraer/insertar canales.
- Especificar los caminos ópticos que posibiliten el intercambio de información.
- Establecer el plan de frecuencias para la transmisión de información, así como los dispositivos adecuados para dicho fin.
- Definir el presupuesto de potencia del enlace a partir de la elección de los componentes a utilizar.
- Calcular el presupuesto de ancho de banda, determinando los componentes necesarios para contrarrestar efectos negativos.
- Determinar si se presenta el efecto no lineal FWM (Mezclado de cuarta onda) y de ser así, especificar una solución.
- Realizar una simulación del diseño y comparar los resultados obtenidos contra la teoría.

II. MARCO TEÓRICO

LA FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es el medio preferido para la transmisión guiada de luz. Se construye con materiales dieléctricos, preferentemente sílice. Una fibra típica tiene 125 μ m de grosor, aproximadamente el doble que el cabello humano. La luz se guía por un núcleo central cuyo diámetro oscila entre 4 y 1000 μ m dependiendo del tipo de fibra (típicamente entre 4 y 62,5 μ m). El resto de la fibra óptica es una cubierta del mismo material, que recubre el núcleo, y que está modificado de forma que tenga un índice de refracción ligeramente inferior al del núcleo. Es precisamente este cambio de índice lo que hace que la luz se guíe por el interior de la fibra [3].

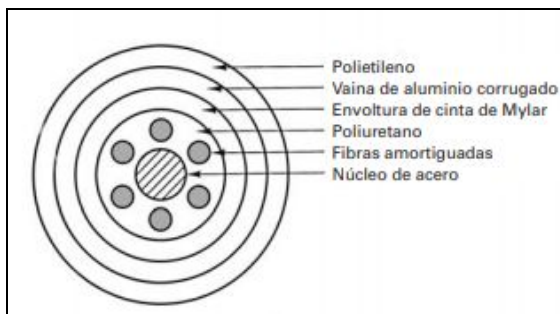


Figura 1. Configuración de cable de fibra óptica.

El cable de fibra óptica trajo un salto cuántico en la capacidad de transmisión. Mientras que los sistemas de

cable coaxial y de relevadores radioeléctricos tenían capacidades de transmisión del orden de Mbps, el cable de fibra óptica, introducido en la década de 1980, presentó capacidades de transmisión en una sola fibra óptica del orden de Gbps y a finales del siglo XX, incluso en el orden de Tbps. La transmisión de fibra óptica y la introducción de la transmisión de datos entre computadoras comenzó una evolución en la que la transmisión de una línea telefónica para los suscriptores se incrementó desde, tradicionalmente, 4 kHz (analógico, equivalente a 64 kbps digitales), para un solo canal telefónico, hasta el orden de Mbps para líneas residenciales y de Gbps para líneas de negocios [2].

ELEMENTOS DE UN ENLACE ÓPTICO

Emisor: Las fuentes luminosas que se usan en los sistemas de fibra óptica deben tener longitudes de onda que se propaguen con eficiencia en la fibra óptica. Además se debe considerar el intervalo de longitudes de onda, porque mientras más amplio sea el intervalo, será más probable que se presente la dispersión cromática. También, las fuentes luminosas deben producir la potencia suficiente para permitir que la luz se propague por la fibra sin causar distorsiones no lineales en ella ni en el receptor. Por último, la fuente luminosa se debe fabricar de tal manera que su salida se pueda acoplar con la fibra en forma eficiente.

En esencia sólo hay dos dispositivos que se usan con frecuencia para generar luz en sistemas de comunicaciones con fibra óptica: diodos emisores de luz (LED) y diodos de láser de inyección (ILD, de injection laser diode). Ambos dispositivos se fabrican con materiales semiconductores, y tienen sus ventajas y desventajas. Los LED normales tienen anchos espectrales de 30 a 50 nm, mientras que los láseres de inyección sólo tienen anchos espectrales de 1 a 3 nm (1 nm corresponde a una frecuencia aproximada de 178 GHz). Por consiguiente, una fuente luminosa de 1320 nm con ancho de raya espectral de 0.0056 nm tiene una amplitud de banda de frecuencias aproximada de 1 GHz. El ancho de raya es el equivalente, en longitudes de onda, del ancho de banda. La preferencia hacia un dispositivo emisor de luz respecto a otro se determina con los requisitos económicos y de funcionamiento del sistema. El mayor costo de los diodos de láser se compensa con una mayor eficiencia, mientras que los diodos emisores de luz, normalmente, tienen menor costo y menor eficiencia.

Receptor o detector: El circuito de recepción es el elemento más complejo del sistema de Comunicaciones Ópticas. Consta de un detector – generalmente optoelectrónico, ya sea un fotodiodo p-I-n (PIN) o un diodo de avalancha (APD)– y de una serie de circuitos recuperadores de las señal: amplificador, filtro, comparador, etc.

Hay dos dispositivos que se suelen usar para detectar la energía luminosa en los receptores de comunicación con fibra óptica: los diodos PIN (tipo p-tipo n intrínseco) y los APD (fotodiodos de avalancha).

Las características más importantes de los detectores de luz son:

1. Responsividad. La responsividad es una medida de la eficiencia de conversión de un fotodetector. Es la relación de la corriente de salida de un fotodiodo entre la potencia óptica que le entra, y tiene unidades de amperes/watt. En general, se menciona la responsividad a una determinada longitud de onda o frecuencia.
2. Corriente oscura. La corriente oscura es la corriente de reposo que pasa por un fotodiodo cuando no hay entrada luminosa. Se debe a portadores generados térmicamente en el diodo.
3. Tiempo de tránsito. Es el tiempo que tarda un portador inducido por la luz en cruzar la región de agotamiento. Este parámetro determina la máxima frecuencia posible de bits con determinado fotodiodo.
4. Respuesta espectral. Es el intervalo de longitudes de onda que se puede usar con determinado fotodiodo. En general, la respuesta espectral relativa se grafica en función de la longitud de onda o de la frecuencia.
5. Sensibilidad a la luz. En esencia, esta sensibilidad es la potencia óptica mínima que puede recibir un detector para producir una señal eléctrica útil de salida. La sensibilidad a la luz se acostumbra mencionar para determinada longitud de onda, ya sea en dBm o en dBu.

Repetidores o Amplificadores: Cuando la distancia a cubrir por un enlace supera un cierto límite (algunas decenas de km, usualmente), la señal se degrada y se atenúa excesivamente, por lo que se hace necesaria la instalación de repetidores. Los repetidores pueden ser simples amplificadores de la señal, o incluir además regeneradores de la misma. Hasta hace poco tiempo, todos los repetidores instalados eran electrónicos: la señal óptica se detectaba, se pasaba a señal eléctrica, se manipulaba (en su caso) como tal, y se reconvertía de nuevo a señal óptica. Actualmente, los regeneradores siguen realizando estas etapas electrónicamente, pero se están sustituyendo los amplificadores electrónicos por amplificadores ópticos de fibra dopada (EDFA). Estos dispositivos amplifican directamente la señal óptica sin conversiones optoelectrónicas.

Fibra compensadora de dispersión: Se caracterizan por poseer un parámetro de dispersión cromática elevado y de signo opuesto al de las fibras convencionales operando en tercera ventana. De este modo, colocando una cierta longitud de DCF tras el enlace de fibra óptica que constituye el sistema de comunicaciones, es posible compensar la dispersión cromática acumulada durante el primer trayecto. Si denominamos D1 y L1 a la dispersión y

longitud del enlace de fibra, y D2 y L2 a la dispersión y longitud de la DCF, respectivamente, entonces la condición para compensar dispersión puede escribirse como: $D1L1 + D2L2 = 0$.

A pesar de lo dicho anteriormente, las DCFs sufren de varios problemas. En primer lugar, 1 km de DCF compensa tan sólo unos 10.12 km de fibra estándar (recientes avances han conseguido producir fibras cuya dispersión excede los -200 ps/km.nm). En segundo lugar sus pérdidas son relativamente elevadas a 1550 nm (alrededor de 0,5 dB/km). Y en tercer lugar, debido a su reducido diámetro modal, la intensidad óptica en el interior de la fibra es superior para una misma potencia óptica, lo cual provoca un acentuamiento de los efectos no lineales. En la actualidad se trabaja sobre estas líneas para mejorar las prestaciones de las DCFs. Algunos resultados ya obtenidos se basan en una estructura de fibra bimodal, alcanzando parámetros de dispersión tan elevados como -770 ps/km.nm con idénticas pérdidas que la fibra estándar.

SISTEMA WDM

El fundamento de la multiplexación por división de longitud de onda (WDM, wavelength division multiplexing) es análogo a la multiplexación por división en frecuencia (FDM, frequency division multiplexing). La técnica WDM consiste en transmitir por una misma fibra varias señales cada una en una longitud de onda diferente y con la misma tasa binaria, sin que interfieran entre sí ya que están lo suficientemente separadas. De este modo la capacidad del enlace se multiplica por el número de canales.

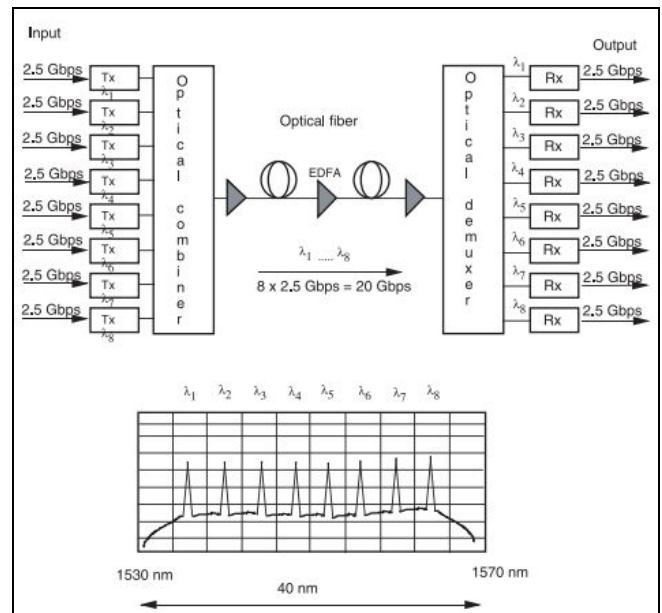


Figura 2. Sistema WDM.

Los transmisores están constituidos con láser monomodos (SLM) con modulación externa para reducir el chirp. Las señales de cada canal se combinan mediante un multiplexor WDM antes de ser introducidas en la fibra óptica. A lo largo del enlace se emplean EDFAs para contrarrestar la atenuación. En el receptor los canales son separados mediante un demultiplexor WDM y conducidos a un receptor. Además se puede extraer un canal específico en un punto intermedio del trayecto mediante multiplexores ópticos de inserción/extracción (OADM, Optical Add-Drop Multiplexer).

Dentro de los sistemas WDM existen dos subtipos:

Los sistemas SWDM (WDM simple), en los cuales las longitudes de onda de las portadoras se encuentran distanciadas ampliamente; por ejemplo, utilizando una portadora a 1550 nm y otra a 1310nm.

Sistemas DWDM (WDM denso), en estos sistemas el espaciado entre las longitudes de onda de los canales es muy reducido, dando lugar a una gran densidad de canales. Estos sistemas consiguen la máxima eficiencia en el uso de la fibra. Cuando se habla de sistema WDM sin indicar la categoría se hace referencia a este segundo grupo de sistemas.

Para garantizar la compatibilidad de los productos de distintos fabricantes y diseñadores de equipos se estableció un estándar por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Éste establece una malla o rejilla de longitudes de onda para la ubicación de los canales WDM. Esta rejilla está situada en la tercera ventana (bandas L, C y S), ya que es la región de mínima atenuación para las fibras y porque los amplificadores ópticos adecuados operan en esta región [2].

La rejilla de la UIT esta especificada en términos de frecuencias. La frecuencia de referencia es 193.1 THz (1552.524 nm) y las restantes se sitúan separadas unas de otras una distancia de 100 ó 50 GHz (0.8 y 0.4 nm, respectivamente). Actualmente se está desarrollando sistemas donde la separación entre canales se reduce a 25 GHz. Esta separación ha de ser tal que se evite la interferencia entre canales adyacentes y la distorsión de las señales. Ésto depende de la estabilidad y selectividad en frecuencia de los filtros y demultiplexores, y de la estabilidad y la anchura espectral de las fuentes ópticas.

Con esta técnica se aprovecha mejor el ancho de banda de la fibra óptica. Además, las tasas de transmisión binaria de cada canal son más bajas que la de la señal multiplexada TDM, por lo que la distancia de transmisión límite impuesta por la dispersión cromática es mucho mayor que en un sistema TDM. De la misma manera la limitación que impone la PDM no es tan grave. Además, la distancia entre

repetidores y amplificadores es mucho mayor al poder emplearse EDFAs por operar en la tercera ventana.

El sistema es más escalable. Es decir, la capacidad de transmisión se puede incrementar de forma modular añadiendo nuevas longitudes de onda. El diseño de los sistemas WDM es transparente al formato y velocidad de transmisión de los datos. Lo cual es la principal ventaja de esta técnica. En redes complejas es más sencillo emplear WDM frente a TDM porque la extracción y la inserción de canales es más sencilla gracias a los elementos ópticos como los OADM [4].

FACTORES QUE LIMITAN LA TRANSMISIÓN

Dispersión: La dispersión es el fenómeno por el cual un pulso se deforma a medida que se propaga a través de la fibra óptica, debido a que las distintas componentes de la señal viajan a distintas velocidades llegando al receptor en distintos instantes de tiempo.

La dispersión supone una reducción del ancho de banda pues al ensancharse los pulsos se limita la tasa de transmisión. La dispersión se caracteriza mediante el parámetro D (ps/nm·km), que indica el ensanchamiento del pulso. Este ensanchamiento aumenta con la longitud recorrida y con el ancho espectral de la fuente óptica.

Dispersión modal: La dispersión modal se debe a que los distintos modos de una fibra óptica tienen distintas velocidades de grupo, como se deduce al observar la constante de propagación, β , tras resolver las ecuaciones de Maxwell que es distinta para cada modo. Esto se puede ver pensando, según la teoría de la óptica de rayos, en la diferencia de caminos que recorre la luz por la fibra según el modo al que se acople. Por tanto este efecto puede solucionarse empleando fibras monomodo, de índice gradual (que reducen la diferencia de la velocidad de grupo de cada modo), entre otras soluciones.

Dispersión por modo polarización: Cuando una fibra es perfectamente circular la constante de propagación entre las polarizaciones es la misma y por tanto también lo es la velocidad de propagación de cada polarización. Pero en el caso de una fibra monomodo cuando no es perfectamente circular, la velocidad de propagación de cada polarización va a ser distinta produciéndose la dispersión por polarización del modo PMD.

Dispersión cromática: El fenómeno de la dispersión cromática surge debido a dos razones:

- **Dispersión material:** es el principal causante de la dispersión, y consiste en que el índice de refracción del silicio, material usado para fabricar las fibras ópticas, depende de la frecuencia. Por ello, las componentes de

distinta frecuencia, viajan a velocidades diferentes por el silicio.

- **Dispersión por guiado de onda:** para comprender esta componente hay que recordar que la potencia de un modo se propaga parcialmente por el núcleo y parcialmente por el revestimiento. El índice efectivo de un modo se sitúa entre el índice de refracción del núcleo y del revestimiento, acercándose más a uno u otro dependiendo de cuál sea el porcentaje de la potencia que se propaga por ellos (si la mayor parte de la potencia está contenida en el núcleo, el índice efectivo estará más cerca del índice de refracción del núcleo). Como la distribución de la potencia de un modo entre el núcleo y el revestimiento depende de la longitud de onda, si la longitud de onda cambia, la distribución de potencia también cambia, provocando un cambio en el índice efectivo o constante de propagación del modo.

Por lo tanto, aún en ausencia de dispersión material, es decir, aunque los índices de refracción del núcleo y del revestimiento sean independientes de la longitud de onda, si la longitud de onda varía, seguiría produciéndose el fenómeno de la dispersión debido a la dispersión por guiado de onda.

Analizando la dispersión de forma matemática, ésta se produce porque la constante de propagación b no es proporcional a la frecuencia angular ω , es decir $db/d\omega$ no es independiente de ω . El término $db/d\omega$ se denota por β_1 , y a $1/\beta_1$, se le denomina velocidad de grupo, que es la velocidad a la que un pulso se propaga a lo largo de la fibra en ausencia de dispersión. Pero como $\beta_2 = d^2b/d\omega^2$ es distinto de cero, se produce la dispersión. A este parámetro β_2 se le denomina parámetro de dispersión de la velocidad de grupo (parámetro GVD), y es el que gobierna la dispersión, también conocida como dispersión de velocidad de grupo.

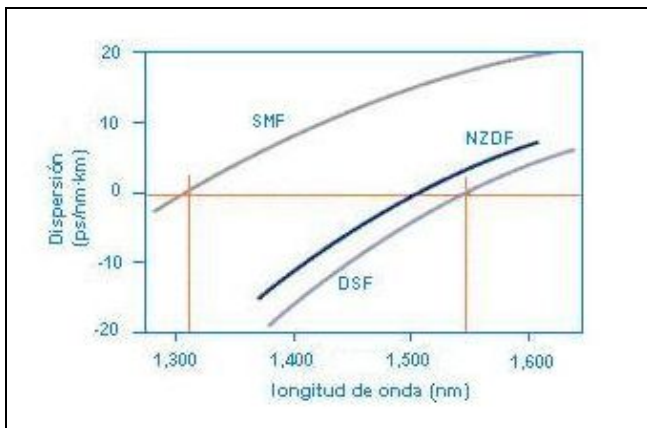


Figura 3. Variación de la dispersión con la longitud de onda para el caso de fibras DSF (Dispersion Shifted Fiber), SMF (Standard Single Mode Fiber) y NZDF (NonZero Dispersion Fiber).

Atenuación: Existen asimismo dos fenómenos fundamentales que atenúan la señal en fibras: la reflexión difusa o scattering, y la absorción. La primera tiene una dependencia potencial inversa con la longitud de onda, mientras que la segunda presenta máximos en la zona ultravioleta e infrarroja media del espectro. Entre una y otra configuran unas zonas o ventanas en las que se dan las mejores condiciones para transmisión por fibra óptica (de sílice; las zonas varían si se cambiase el material). Las dos ventanas al uso en la actualidad son la segunda ventana, a 1310 nm, y la tercera ventana a 1550 nm. La segunda ventana, además, coincide con la zona de mínima dispersión, mientras que la tercera ventana es la que produce mínima atenuación.

La tendencia actual es emplear preferentemente la tercera ventana. Además de su mínima atenuación, es la región espectral donde pueden emplearse los amplificadores de fibra dopada. Para mejorar las características de dispersión, se han diseñado fibras ópticas de dispersión desplazada y de dispersión aplanada, que presentan mínimos de dispersión en tercera ventana.

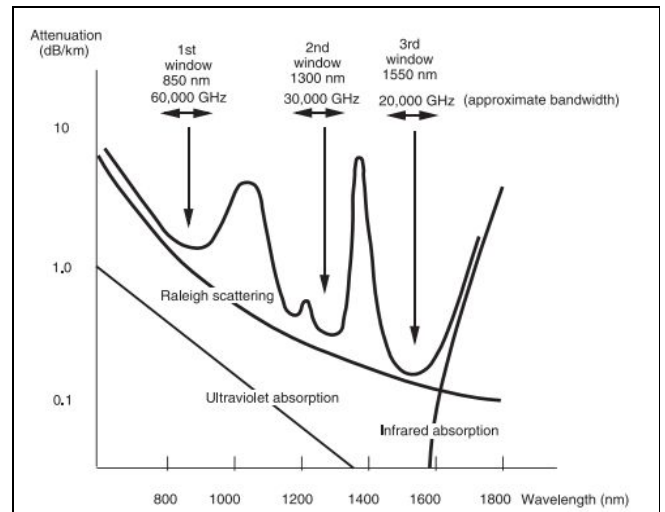


Figura 4. Ventanas de mínima atenuación para transmisión por fibra óptica.

III. NODOS PRINCIPALES Y RUTA FÍSICA

Para tener la certeza de los puntos geográficos en donde es viable la ubicación de los equipos de comunicaciones se decide usar como base la Red de Subestaciones Eléctricas de Colombia. Mientras que, para establecer el camino del tendido de fibra óptica se usa como base el Mapa de Vías en Colombia.

De esta manera, se obtiene la ruta de la figura 4, que contiene como puntos geográficos principales los extremos Bogotá (Torca) y Cúcuta, y los puntos intermedios en

Chivor (Boyacá), Sochagota (Boyacá), San Gil (Santander, próximo a Guatiguará) y Bucaramanga (Santander).



Figura 4. Ruta completa del enlace de fibra óptica entre Bogotá y Cúcuta.

Con la ruta definida procedemos a especificar la ubicación de los OADM. Los módulos de adición/extracción de canales estarán en las dos ciudades con mayor importancia a nivel nacional (además de las ciudades terminales), como lo son Bucaramanga y San Gil, por su fácil acceso a la hora de instalación de equipos y porque son ciudades con mayor necesidad de intercambio de información.

Las distancias entre los puntos geográficos importantes que comprende la ruta se especifican en la tabla 1.

Tabla 1. Distancias entre puntos importantes del enlace.

Intervalo	Distancia
Bogotá – Chivor	110 Km
Chivor – Sochagota	220 Km
Sochagota – San Gil	123 Km
San Gil – Bucaramanga	73 Km
Bucaramanga – Cúcuta	135 Km
TOTAL	661 Km

Para facilitar el manejo de las ubicaciones durante el documento, se utilizará la siguiente notación, para así construir la topología física de la red (figura 5):

- A. Bogotá
- B. San Gil
- C. Bucaramanga
- D. Cúcuta

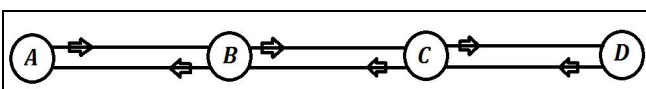


Figura 5. Topología física del enlace Bogotá - Cúcuta.

IV. CAMINOS ÓPTICOS

Con el fin de permitir un intercambio de información total entre los puntos, se asumen los siguientes 6 caminos ópticos, basados en la topología física.

1. AD ----> ABCD
2. AB ----> AB
3. BC ----> BC
4. CD ----> CD
5. AC ----> ABC
6. BD ----> BCD

De esta manera podemos construir la topología virtual de la figura 6.

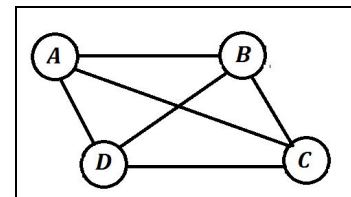


Figura 6. Topología virtual del enlace Bogotá - Cúcuta.

A partir de los caminos ópticos es posible continuar con la asignación de longitudes de onda (coloreado de la red). Se decide observar los caminos que comparten enlaces físicos, y a partir de esto realizar reúso de portadoras. La definición del coloreado de la red se puede ver en la Figura 7, con el número de portadora al lado de cada camino.

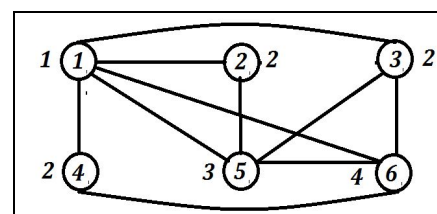


Figura 7. Asignación de cantidad mínima de portadoras ópticas a cada camino.

Se puede ver que con 4 portadoras ópticas es posible construir la red. Sin embargo, se usan 16 portadoras ópticas con fines de aumento de capacidad, asignadas a cada camino de la siguiente manera:

1. AD (ABCD) ► $\lambda_1, \lambda_5, \lambda_9, \lambda_{10}, \lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{13}, \lambda_{14}, \lambda_{15}, \lambda_{16}$.
2. AB (AB) ► λ_2, λ_6 .
3. BC (BC) ► λ_2, λ_6 .
4. CD (CD) ► λ_2, λ_6 .
5. AC (ABC) ► λ_3, λ_7 .

6. BD (BCD) ► λ_4, λ_8 .

De esta manera obtenemos el siguiente factor de reúso:

$$FR = \frac{\# \text{ Caminos ópticos}}{\# \text{ Portadoras diferentes}} = \frac{20}{16} = 1,25$$

V. ELECCIÓN DEL TRANSCÉPTOR Y PLAN DE FRECUENCIAS

El transceptor a utilizar es el FTLX4213C3xxxx (donde los números xxxx de la referencia dependen del rango de canales ITU que maneja), el cual soporta tasas de transmisión de hasta 11,3 Gbps (por portadora óptica) y trabaja sobre la banda C (banda de 1550 nm), además de lograr transmitir a una distancia máxima de 200 Km.

Tabla 2. Canales ópticos soportados dependiendo la referencia del transceptor.

ITU Channel #	Finisar Part Number	Start Frequency (THz)	End Frequency (THz)	Start Wavelength (nm)	End Wavelength (nm)
9155 - 9190	FTLX4213C3C155N2	191.55	191.90	1562.23	1565.09
9175 - 9210	FTLX4213C3C175N2	191.75	192.10	1560.61	1563.46
9195 - 9230	FTLX4213C3C195N2	191.95	192.30	1558.98	1561.83
9205 - 9240	FTLX4213C3C205N2	192.05	192.40	1558.17	1561.01
9215 - 9250	FTLX4213C3C215N2	192.15	192.50	1557.36	1560.20
9235 - 9270	FTLX4213C3C235N2	192.35	192.70	1555.75	1558.58
9255 - 9290	FTLX4213C3C255N2	192.55	192.90	1554.13	1556.96
9275 - 9310	FTLX4213C3C275N2	192.75	193.10	1552.52	1555.34
9295 - 9330	FTLX4213C3C295N2	192.95	193.30	1550.92	1553.73
9305 - 9340	FTLX4213C3C305N2	193.05	193.40	1550.12	1552.93
9315 - 9350	FTLX4213C3C315N2	193.15	193.50	1549.32	1552.12
9335 - 9370	FTLX4213C3C335N2	193.35	193.70	1547.72	1550.52
9355 - 9390	FTLX4213C3C355N2	193.55	193.90	1546.12	1548.91
9395 - 9430	FTLX4213C3C395N2	193.95	194.30	1542.94	1545.72
9405 - 9440	FTLX4213C3C405N2	194.05	194.40	1542.14	1544.92
9415 - 9450	FTLX4213C3C415N2	194.15	194.50	1541.35	1544.13
9435 - 9470	FTLX4213C3C435N2	194.35	194.70	1539.77	1542.54
9455 - 9490	FTLX4213C3C455N2	194.55	194.90	1538.19	1540.95
9475 - 9510	FTLX4213C3C475N2	194.75	195.10	1536.61	1539.37
9505 - 9540	FTLX4213C3C505N2	195.05	195.40	1534.25	1537.00
9515 - 9550	FTLX4213C3C515N2	195.15	195.50	1533.47	1536.22
9535 - 9570	FTLX4213C3C535N2	195.35	195.70	1531.90	1534.64
9555 - 9590	FTLX4213C3C555N2	195.55	195.90	1530.33	1533.07
9575 - 9610	FTLX4213C3C575N2	195.75	196.10	1528.77	1531.51

Cada referencia de transceptor soporta la transmisión/recepción de 4 canales separados por una banda de guarda de 100 GHz (0.8 nm), de esta manera, como vamos a transmitir 16 portadoras ópticas, usaremos 4 referencias de transceptores por nodo terminal (FTLX4213C3C305N2, FTLX4213C3C355N2, FTLX4213C3C395N2 y FTLX4213C3C435N2).

Tabla 3. Canales ópticos a utilizar en el enlace.

ID de portadora	Longitud de onda [nm]	Frecuencia [THz]
1	1552,93	193.05
2	1552,12	193.15
3	1551,32	193.25
4	1550,52	193.35
5	1548,91	193.55
6	1548,11	193.65
7	1547,32	193.75
8	1546,52	193.85
9	1545,72	193.95
10	1544,92	194.05
11	1544,12	194.15
12	1543,33	194.25
13	1542,53	194.35
14	1541,74	194.45
15	1540,95	194.55
16	1540,16	194.65

VI. DESCRIPCIÓN DE LOS DEMÁS ELEMENTOS DE LA RED

La red usa DWDM para la transmisión/recepción de información. Para esto se emplean Mux/Demux de 16 canales, exactamente la referencia 50123 del fabricante FS.COM, que cuenta con un puerto de expansión para garantizar flexibilidad de la red. Como características a tener en cuenta ofrecidas por el fabricante de este elemento están las pérdidas de retorno de 45 dB, las pérdidas de inserción menores a 4 dB y el espaciamiento entre canales de 100 GHz (0.8 nm).

Para el diseño se usan 24 hilos de fibra monomodo (Full Dúplex), para transmitir las portadoras a una velocidad máxima de 4 Gbps para evitar la dispersión por modo polarización. Por lo tanto, la tasa de transmisión total es:

$$f_{bTotal} = f_{b\lambda} \times \#\lambda \times \#hilos \text{ de fibra}$$

$$f_{bTotal} = 4 \text{ Gbps} \times 16 \times 24 = 1,536 \text{ Tbps}$$

Además, la adición/extracción de canales en los diferentes nodos intermedios del enlace se va a realizar por medio del OADM 57890 del fabricante FS.COM, el cual tiene las mismas características que el Mux mencionado en cuanto a separación de canales y pérdidas de retorno, contando además con pérdidas de inserción menores a 2 dB.

El enlace usa también Fibra óptica Altos, de la marca Corning, la cual es monomodo de uso en exterior, y cuyas principales características son las longitudes de onda soportadas en 1310 nm/1363 nm/1550 nm y la atenuación máxima por Km, que para la longitud de onda en la cual se va manejar el enlace (1550 nm) va a ser de 0,3 dB/km. Esta fibra óptica se vende en carretes de 12,2 Km, valor que nos será de utilidad para conocer el número de empalmes.

Por otra parte, los conectores utilizados son de tipo LC de la marca Corning, con una atenuación de 0,5 dB como máximo y 0,2 dB como mínimo (el valor mínimo se logra con la compatibilidad entre los conectores y la fibra según indica el fabricante que da el 100% de garantía de cumplir con dichas especificaciones).

VII. PRESUPUESTO DE POTENCIA

Para llevar a cabo el presupuesto de potencia se hace necesario, además de conocer las características del equipo transmisor/receptor, conocer todas las pérdidas que insertan los equipos, los conectores y la fibra que se usa en el sistema; para ello se revisaron las tablas de especificaciones que ofrece cada fabricante.

Para el caso del transceptor, a modo de transmisor, ofrece una potencia nominal de 4 dBm a su salida; mientras que como receptor, su sensibilidad está dada por -25 dBm y puede recibir máximo -7 dBm (límite para evitar saturación). Para cumplir con la potencia necesaria, se calcula el presupuesto de potencia en los segmentos A-B, B-C y C-D. De esta manera, todos los caminos planteados cumplirán en términos de potencia con la transmisión. Con los datos mencionados previamente, se buscó hallar la ganancia necesaria para lograr obtener el BER proyectado, y de esta manera conocer el número de amplificadores que se deben colocar a lo largo del enlace.

En la tabla 4 se hace un breve resumen de los datos necesarios para llevar a cabo el cálculo de presupuesto de potencia en cada segmento.

Tabla 4. Parámetros para cálculo del presupuesto de potencia.

Parámetros	Valor
Potencia del transmisor (transceiver), P_T	4 dBm
Sensibilidad del receptor (transceiver), S	-25 dBm
Pérdidas mux/demux DWDM	4,5 dB (incluye conectores)
Pérdidas OADM	2 dB
Factor de atenuación de fibra óptica, α_{FO}	0,3 dB/Km @ Banda C
Pérdidas por conector LC, α_C	0,5 dB
Pérdidas por empalme, α_E	0,05 dB
Longitud de carrete	12,2 Km
Margen de diseño, MD	2 dB
Longitud Segmento A-B	453 Km
Longitud Segmento B-C	73 Km
Longitud Segmento C-D	135 Km

Ya que el enlace es de larga distancia y se sabe que se deben incluir módulos compensadores de la dispersión, se incluye un factor de pérdidas L_{DCM} que representa pérdidas de inserción causadas por los DCM. Estas pérdidas serán de 3.5 dB como lo dice el fabricante. Las especificaciones de dichos módulos se tratarán más adelante en el presupuesto de ancho de banda.

A. Segmento Bogotá - San Gil

Como ya se mencionó, el carrete de fibra óptica tiene longitud de 12,2 Km, y al tener una longitud del segmento de 453 Km, el número de empalmes en esta parte del enlace es:

$$\frac{453 \text{ Km}}{12,2 \text{ Km}} = 37,13 \rightarrow 38 \text{ Segmentos de fibra} \rightarrow 37 \text{ Empalmes}$$

Calculando las pérdidas totales del segmento tenemos:

$$L_{TT} = (\alpha_{FO} \times l_{FO}) + (\alpha_C \times \#Conectores) + (\alpha_E \times \#Empalmes) + (L_{MUX/DEMUX}) + (L_{DCM}) + MD$$

$$L_{TT} = (0,3 \text{ dB/Km} \times 453 \text{ Km}) + (0,5 \text{ dB} \times 2) + (0,05 \text{ dB} \times 37) + 4,5 \text{ dB} + 3,5 \text{ dB} + 2 \text{ dB}$$

$$L_{TT} = 148,75 \text{ dB}$$

Por lo tanto, sin incluir amplificadores, tendríamos una potencia de recepción en el punto B de:

$$P_{RXB} = P_T - L_{TT} = 4 \text{ dBm} - 148,75 \text{ dB} = -144,75 \text{ dBm}$$

Necesitando entonces una ganancia tal que me asegure que llegue al menos una potencia igual a la de Sensibilidad de receptor:

$$G = S - P_{RXB} = -25 \text{ dBm} - (-144,75 \text{ dBm}) = 119,75 \text{ dB}$$

Para lograr dicha ganancia, se usan amplificadores ópticos tipo booster en el punto A y amplificadores de línea de la marca MRV, con referencia EM316EA. El fabricante de dichos dispositivos nos afirma lo siguiente en las hojas de datos.

Tabla 5. Especificaciones de los amplificadores ópticos.

Ordering Information: C-BAND (1529 - 1563nm)		
Model	Description	Gain (dB)
Booster		
EM316EA-BR0918	DWDM C-band EDFA booster, optical amplifier, 2 slots	9
EM316EA-BR1522	DWDM C-band EDFA booster optical amplifier, with Automatic Power Reduction (APR), 2 slots	15
EM316EA-BR2022	DWDM C-band EDFA booster, optical amplifier, with Automatic Power Reduction (APR), 2 slots	20
EM316EA-BR1525	DWDM C-band EDFA booster, optical amplifier, with Automatic Power Reduction (APR), 2 slots	15
In-Line/Pre-Amp		
EM316EA-PR1013	DWDM C-band EDFA preamp, optical amplifier, 2 slots	10
EM316EA-LPR2017	DWDM C-band EDFA in-line/preamp, optical amplifier, 2 slots	20
EM316EA-IL2622	DWDM C-band EDFA in-line, optical amplifier, with Automatic Power Reduction (APR), 2 slots	26
EM316EA-IL2625	DWDM C-band EDFA in-line/preamp, optical amplifier, with Automatic Power Reduction (APR), 2 slots	26

Se usaron amplificadores tipo EDFA. El amplificador tipo Booster ofrece una ganancia de 20 dB mientras que el amplificador de línea ofrece una ganancia de 26 dB.

De esta manera, si se coloca un amplificador tipo Booster se tendría una ganancia adicional de 20 dB, haciendo falta 99,75 dB para garantizar el BER proyectado para el primer segmento. Conociendo esto, se puede hallar el número de amplificadores ópticos de línea para cumplir con la ganancia estimada:

$$\#AOL = \frac{99,75 \text{ dB}}{26 \text{ dB}} = 3,83 \rightarrow 4 \text{ AOL}$$

Teniendo como resultado, para el presupuesto de potencia del primer segmento, un diagrama físico como se muestra a continuación.

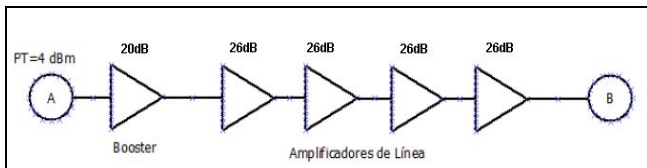


Figura 8. Esquema de conexión de amplificadores ópticos segmento Bogotá - San Gil.

Ya que tenemos 4 amplificadores ópticos de línea nuevos, se necesitará dividir A - B en 5 sub-segmentos de fibra, cada uno con la siguiente longitud:

$$\frac{453 \text{ Km}}{5} = 90,6 \text{ Km}$$

Y ya que tenemos carretes de 12,2 Km de fibra, el número de empalmes recalculado sería de:

$$\frac{90,6 \text{ Km}}{12,2 \text{ Km}} = 7,42 \rightarrow 8 \text{ Empalmes por sub-segmento} \rightarrow 8 \times 5 = 40 \text{ Empalmes en Total}$$

Y al colocar elementos nuevos, tendremos 8 conectores más, lo que implica que el número de conectores definitivo en este segmento sería de 10.

Teniendo en cuenta los nuevos datos, las pérdidas totales calculadas serían de:

$$L_{TT} = (\alpha_{FO} \times l_{FO}) + (\alpha_C \times \#Conectores) + (\alpha_E \times \#Empalmes) + (L_{MUX/DMUX}) + (L_{DCM}) + MD$$

$$L_{TT} = (0,3 \text{ dB/Km} \times 453 \text{ Km}) + (0,5 \text{ dB} \times 10) + (0,05 \text{ dB} \times 40) + 4,5 \text{ dB} + 3,5 \text{ dB} + 2 \text{ dB}$$

$$L_{TT} = 150,4 \text{ dB}$$

Y mirando la ecuación de presupuesto de potencia, se tendría:

$$P_T + G_{AOL} + G_{Booster} - L_{TT} = P_B$$

$$P_B = 4 \text{ dBm} + (4 \times 26 \text{ dB}) + 20 \text{ dB} - 152,9 \text{ dB}$$

$$P_B = 4 \text{ dBm} + 104 \text{ dB} + 20 \text{ dB} - 150,4 \text{ dB} = -22,4 \text{ dB}$$

Esta potencia se usa para el inicio del análisis del siguiente segmento.

B. Segmento San Gil - Bucaramanga

El segmento inicia con la P_B mencionada previamente y además, se incluyen las pérdidas de inserción que especifica el primer OADM (2 dB). Este segmento que va desde San Gil hasta Bucaramanga tiene una longitud de 73 Km, y como el carrete de fibra tiene 12,2 Km, el número de empalmes necesario en esta parte del enlace es:

$$\frac{73 \text{ Km}}{12,2 \text{ Km}} = 5,98 \rightarrow 6 \text{ Segmentos de fibra} \rightarrow 5 \text{ Empalmes}$$

Calculando las pérdidas del segmento:

$$L_{TT} = (\alpha_{FO} \times l_{FO}) + (\alpha_C \times \#Conectores) + (\alpha_E \times \#Empalmes) + (L_{OADM}) + (L_{DCM}) + MD$$

$$L_{TT} = (0,3 \text{ dB/Km} \times 73 \text{ Km}) + (0,5 \text{ dB} \times 2) + (0,05 \text{ dB} \times 5) + 2 \text{ dB} + 3,5 \text{ dB} + 2 \text{ dB}$$

$$L_{TT} = 31,65 \text{ dB}$$

Por lo tanto, sin incluir amplificadores, tendríamos una potencia de recepción en el punto C de:

$$P_{RXC} = P_B - L_{TT} = -22,4 \text{ dBm} - 31,65 \text{ dB} = -54,15 \text{ dBm}$$

Así, la ganancia para asegurar al menos una potencia igual a la de sensibilidad de receptor es:

$$G = S - P_{RXC} = -25 \text{ dBm} - (-54,15 \text{ dBm}) = 29,15 \text{ dB}$$

Se colocaron dos amplificadores ópticos de línea en este segmento, los cuales ofrecen cada uno una potencia de 20 dB, para un total de 40 dB de ganancia, para tener un esquema de conexión como el mostrado a continuación.

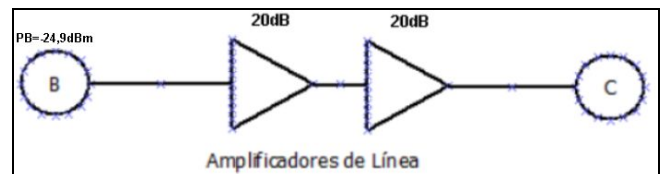


Figura 9. Esquema de conexión de amplificadores ópticos segmento San Gil - Bucaramanga.

Con los dos amplificadores ópticos de línea se dividió B-C en 3 sub-segmentos, cada uno con longitud:

$$\frac{73 \text{ Km}}{3} = 24,33 \text{ Km}$$

Con carretes de fibra de 12,2 Km, el número de empalmes recalculados en este segmento es:

$$\frac{24,33 \text{ Km}}{12,2 \text{ Km}} = 1,99 \rightarrow 2 \text{ Empalmes por sub-segmento} \rightarrow 2 \times 3 = 6 \text{ Empalmes en Total}$$

Además, al colocar el par de elementos nuevos, se tienen 4 conectores más, lo que implica que el número de conectores definitivo en este sub-segmento es de 6.

Teniendo en cuenta los nuevos datos, las pérdidas totales recalculadas para esta parte del enlace son:

$$L_{TT} = (\alpha_{FO} \times l_{FO}) + (\alpha_C \times \#Conectores) + (\alpha_E \times \#Empalmes) + (L_{OADM}) + MD$$

$$L_{TT} = (0,3 \text{ dB/Km} \times 73 \text{ Km}) + (0,5 \text{ dB} \times 6) + (0,05 \text{ dB} \times 6) + 2 \text{ dB} + 3,5 \text{ dB} + 2 \text{ dB}$$

$$L_{TT} = 32,7 \text{ dB}$$

Y mirando la ecuación de presupuesto de potencia, se obtuvo:

$$P_B + G_{AOL} - L_{TT} = P_C$$

$$P_C = -22,4 \text{ dBm} + (2 \times 20 \text{ dB}) - 33,7 \text{ dB}$$

$$P_C = -22,4 \text{ dBm} + 40 \text{ dB} - 33,7 \text{ dB} = -15,1 \text{ dB}$$

Esta potencia será la de entrada para el siguiente segmento.

C. Segmento Bucaramanga - Cúcuta

Este segmento inicia con la P_C calculada previamente y además, se incluyen las pérdidas de inserción del segundo OADM (2 dB) y del Demux ubicado en Cúcuta (4,5 dB). Este segmento que va desde Bucaramanga hasta el nodo terminal en Cúcuta, tiene una longitud de 135 Km, y ya que el carrete de fibra tiene 12,2 Km, el número de empalmes necesario en esta parte del enlace es:

$$\frac{135 \text{ Km}}{12,2 \text{ Km}} = 11,065 \rightarrow 12 \text{ Segmentos de fibra} \rightarrow 11 \text{ Empalmes}$$

Las pérdidas del segmento C-D serían:

$$L_{TT} = (\alpha_{FO} \times l_{FO}) + (\alpha_C \times \#Conectores) + (\alpha_E \times \#Empalmes) + (L_{OADM}) + (L_{MUX/DMUX}) + (L_{DCM}) + MD$$

$$L_{TT} = (0,3 \text{ dB/Km} \times 135 \text{ Km}) + (0,5 \text{ dB} \times 2) + (0,05 \text{ dB} \times 11) + 2 \text{ dB} + 4,5 \text{ dB} + 3,5 \text{ dB} + 2 \text{ dB}$$

$$L_{TT} = 54,05 \text{ dB}$$

Entonces, sin incluir amplificadores, tendríamos una potencia de recepción en el punto D en Cúcuta de:

$$P_{RXD} = P_C - L_{TT} = -15,1 \text{ dBm} - 54,05 \text{ dB} = -70,15 \text{ dBm}$$

Necesitando entonces una ganancia (para asegurar al menos una potencia igual a la de sensibilidad de receptor) de:

$$G = S - P_{RXD} = -25 \text{ dBm} - (-70,15 \text{ dBm}) = 45,15 \text{ dB}$$

Por lo tanto, se usan dos amplificadores ópticos de línea en este último segmento, los cuales, como se ha mencionado, ofrecen cada uno una potencia de 26 dB, para un total de 52 dB de ganancia, teniendo un esquema de conexión como el mostrado a continuación.

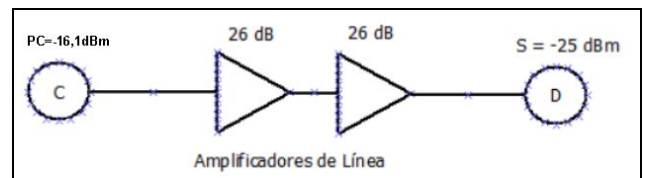


Figura 10. Esquema de conexión de amplificadores ópticos segmento Bucaramanga - Cúcuta.

Con la inclusión de estos 2 amplificadores ópticos de línea se divide C-D en 3 sub-segmentos de fibra, cada uno con longitud:

$$\frac{135 \text{ Km}}{3} = 45 \text{ Km}$$

Además, con los carretes de 12,2 Km de fibra, el número de empalmes recalculados en este segmento es:

$$\frac{45 \text{ Km}}{12,2 \text{ Km}} = 3,688 \rightarrow 4 \text{ Empalmes por sub-segmento} \rightarrow 4 \times 3 = 12 \text{ Empalmes en Total}$$

Al colocar el par de amplificadores surgen 4 conectores más, lo que conlleva a que el número de conectores definitivo en este sub-segmento es de 6.

Teniendo en cuenta los nuevos datos, las pérdidas totales recalculadas para esta parte del enlace serían de:

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
ESPECIALIZACIÓN EN TELECOMUNICACIONES MÓVILES

$$L_{TT} = (\alpha_{FO} \times l_{FO}) + (\alpha_C \times \#Conectores) + (\alpha_E \times \#Empalmes) + (L_{OADM}) + (L_{MUX/DMUX}) + (L_{DCM}) + MD$$

$$L_{TT} = (0,3 \text{ dB/Km} \times 135 \text{ Km}) + (0,5 \text{ dB} \times 6) + (0,05 \text{ dB} \times 12) + 2 \text{ dB} + 4,5 \text{ dB} + 3,5 \text{ dB} + 2 \text{ dB}$$

$$L_{TT} = 56,1 \text{ dB}$$

Y mirando la ecuación de presupuesto de potencia tenemos:

$$P_C + G_{AOL} - L_{TT} = P_D$$

$$P_D = -15,1 \text{ dBm} + (2 \times 26 \text{ dB}) - 56,1 \text{ dB}$$

$$P_D = -15,1 \text{ dBm} + 52 \text{ dB} - 56,1 \text{ dB} = -19,2 \text{ dBm}$$

Y ya que la sensibilidad del receptor es de -25 dBm, se cumpliría que:

$$P_D > S$$

$$-19,2 \text{ dBm} > -25 \text{ dBm}$$

Garantizando:

$$BER_{RESULTADO} \leq BER_{PROYECTADO}$$

Cumpliendo con el objetivo del presupuesto de potencia para el enlace desde Bogotá hasta Cúcuta y cada uno de los caminos lógicos planteados.

VIII. PRESUPUESTO DE ANCHO DE BANDA

Ya que la fibra óptica que se usa en el diseño es del tipo monomodo, la dispersión de tipo modal no se tiene en cuenta en el cálculo del presupuesto de ancho de banda. Además, la tasa de transmisión de cada portadora es de 4 Gbps, lo que nos permite también evitar la dispersión PMD y no tenerla presente en el mismo cálculo. Teniendo en cuenta estas consideraciones, la dispersión que se presenta en el enlace es de tipo cromática.

A. Segmento Bogotá - San Gil

Según el fabricante del transmisor que utilizado, el láser posee una coherencia espectral de 0,3 nm, mientras que la fibra óptica para la banda C, posee un coeficiente de dispersión cromática de 6 ps/nmKm. De esta manera, la dispersión cromática para el segmento Bogotá - San Gil es:

$$DC = Dc \times \Lambda \times L = 6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 453 \text{ Km} \\ = 815,4 \text{ ps} = Ts$$

Sin compensadores de dispersión, se podría transmitir con un ancho de banda de:

$$B = \frac{0,35}{Ts} = \frac{0,35}{815,4 \text{ ps}} = 429,237 \text{ MHz}$$

Con NRZ, equivaldría a una tasa de transmisión por portadora de:

$$fb = 2 \times B = 858,474 \text{ Mbps}$$

Por lo tanto es necesario el uso de compensadores de la dispersión.

Ya que se desean transmitir 4 Gbps por portadora, es necesario un ancho de banda de:

$$B = \frac{fb}{2} = \frac{4 \text{ Gbps}}{2} = 2 \text{ GHz}$$

Lo que implica tener un tiempo de subida de:

$$Ts = \frac{0,35}{B} = \frac{0,35}{2 \text{ GHz}} = 175 \text{ ps}$$

Se necesitan compensar, para este primer segmento:

$$815,4 \text{ ps} - 175 \text{ ps} = 640,4 \text{ ps}$$

Esta compensación de dispersión se hace por medio de módulos DCM, específicamente los ofrecidos por el fabricante MRV, con referencia EM316DCM120, el cual trabaja en banda C y tiene pérdidas de inserción bajas (por el orden de 3.5 dB), y nos permite realizar la compensación desde el primer canal hasta el último entre -1872 y -2148 ps/nm.

Ya que la dispersión que especifica el fabricante está dada en unidades de ps/nm, tenemos que, para el láser del transmisor (con coherencia espectral de 0,3 nm), el módulo DCM ofrece una dispersión (teniendo en cuenta que el fabricante afirma que es diferente para el primer y para el último canal) de:

$$DC_{DCM1 \text{ primer canal}} = Dc_{DCM1} \times \Lambda = -1872 \text{ ps/nm} \times 0,3 \text{ nm} \\ = -561,6 \text{ ps}$$

$$DC_{DCM1 \text{ ultimo canal}} = Dc_{DCM1} \times \Lambda = -2148 \text{ ps/nm} \times 0,3 \text{ nm} \\ = -644 \text{ ps}$$

Por lo tanto, el enlace en este tramo quedaría compensado para todos los canales y con un sólo módulo de DCM se tendría una dispersión de:

$$815,4 \text{ ps} - 561,6 \text{ ps} = 253,8 \text{ ps} = Ts$$

$$815,4 \text{ ps} - 644 \text{ ps} = 171,6 \text{ ps} = Ts$$

Con este módulo DCM (DCM 120) lograremos compensar lo suficiente para garantizar la correcta comunicación con el ancho de banda proyectado. Como el módulo introduce una dispersión cromática fija, este se ubica en el cuarto amplificador de línea del segmento Bogotá - San Gil ubicado en el Km 362,4. La dispersión acumulada por la fibra en el Km 362,4, se resta con la dispersión cromática del DCM en esta ubicación. Cuando la información llegue al punto final del segmento (San Gil) se acumulará de nuevo cierta dispersión cromática, la cual permite comunicar el enlace con el ancho de banda presupuestado:

$$DC \text{ segmento} = DC_{Km362} + DC_{DCM120} + DC_{Km90,6}$$

$$DC \text{ segmento (Máx)} = (6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 362,4 \text{ Km}) - (2148 \text{ [ps/nm]} \times 0,3 \text{ nm}) + (6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 90,6 \text{ Km})$$

$$DC \text{ segmento (Min)} = (6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 362,4 \text{ Km}) - (2148 \text{ [ps/nm]} \times 0,3 \text{ nm}) + (6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 90,6 \text{ Km})$$

$$DC \text{ segmento (Máx)} = 652 \text{ ps} - 561,6 \text{ ps} + 163 \text{ ps} = 253,8 \text{ ps}$$

$$DC \text{ segmento (Min)} = 652 \text{ ps} - 644 \text{ ps} + 163 \text{ ps} = 171,6 \text{ ps}$$

Con esta dispersión comienza el análisis del siguiente segmento.

B. Segmento San Gil - Bucaramanga

La dispersión cromática total del segmento San Gil - Bucaramanga es (en el peor caso, con la DC_{MAYOR}):

$$DC \text{ segmento} = DC_{acumulada} + (Dc \times \Lambda \times L)$$

$$DC \text{ segmento} = 253,8 \text{ ps} + (6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 73 \text{ Km}) = 385 \text{ ps} = T_s$$

Por lo tanto, sin compensadores de dispersión, podríamos transmitir con un ancho de banda de:

$$B = \frac{0,35}{T_s} = \frac{0,35}{385 \text{ ps}} = 909,09 \text{ MHz}$$

Que con NRZ, equivaldría a una tasa de transmisión por portadora de:

$$fb = 2 \times B = 1,818 \text{ Gbps}$$

Por lo tanto es necesario el uso de compensadores de la dispersión en este segmento.

Se necesitan compensar (teniendo en cuenta el mismo cálculo del segmento pasado):

$$385 \text{ ps} - 175 \text{ ps} = 210 \text{ ps}$$

Esta compensación de dispersión se hace por medio del módulo DCM50. Se usan los módulos ofrecidos por el fabricante MRV, con referencia EM316DCM50, el cual trabaja en banda C y tiene pérdidas de inserción bajas, del orden de 3.5 dB, y nos permite realizar la compensación desde el primer canal hasta el último entre -773 y -890 ps/nm.

Para el láser del transmisor (con coherencia espectral de 0,3 nm), el módulo DCM dará una dispersión de:

$$DC_{DCM1 \text{ primer canal}} = Dc_{DCM1} \times \Lambda = -773 \text{ ps/nm} \times 0,3 \text{ nm} = -231,9 \text{ ps}$$

$$DC_{DCM1 \text{ ultimo canal}} = Dc_{DCM1} \times \Lambda = -890 \text{ ps/nm} \times 0,3 \text{ nm} = -267 \text{ ps}$$

Por lo tanto, el enlace en este tramo queda compensado para todos los canales, teniendo una dispersión al final del segmento (máxima y mínima) de:

$$385 - 231,9 \text{ ps} = 153,1 \text{ ps}$$

$$385 - 267 \text{ ps} = 118 \text{ ps}$$

Con este módulos DCM (DCM 50) lograremos compensar lo suficiente para garantizar la correcta comunicación con el ancho de banda proyectado ($T_s < 175 \text{ ps}$).

Como el módulo introduce una dispersión cromática fija, este se podrá ubicar en el segundo amplificador de línea del enlace San Gil - Bucaramanga, ubicado en el Km 48. La dispersión acumulada por la fibra en el Km 48, se resta con la dispersión cromática del DCM en esta ubicación y cuando llegue al punto final (Bucaramanga) se acumula de nuevo cierta dispersión cromática, pero permitirá comunicar el enlace con el ancho de banda presupuestado.

$$DC \text{ segmento} = DC_{acumulada} + DC_{Km48,66} + DC_{DCM50} + DC_{Km24,33}$$

$$DC \text{ segmento (mayor)} = 253 \text{ ps} + (6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 48,66 \text{ Km}) - (773 \text{ [ps/nm]} \times 0,3 \text{ nm}) + (6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 24,33 \text{ Km})$$

$$DC \text{ segmento (menor)} = 253 \text{ ps} + (6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 48,66 \text{ Km}) - (890 \text{ [ps/nm]} \times 0,3 \text{ nm}) + (6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 24,33 \text{ Km})$$

$$DC \text{ segmento (mayor)} = 253 \text{ ps} + 87,58 \text{ ps} - 231,9 \text{ ps} + 43,79 \text{ ps} = 153,1 \text{ ps}$$

$$DC \text{ segmento (menor)} = 253 \text{ ps} + 87,58 \text{ ps} - 267 \text{ ps} + 43,79 \text{ ps} = 118 \text{ ps}$$

C. Segmento Bucaramanga - Cúcuta

La dispersión cromática para el segmento Bucaramanga - Cúcuta es:

$$DC \text{ segmento} = DC_{\text{acumulada}} + (Dc \times \Lambda \times L)$$

$$DC \text{ segmento} = 153,1 \text{ ps} + (6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 135 \text{ Km}) = 396 \text{ ps} = T_s$$

Por lo tanto, sin compensadores de dispersión, podríamos transmitir con un ancho de banda de:

$$B = \frac{0,35}{T_s} = \frac{0,35}{396 \text{ ps}} = 883,838 \text{ MHz}$$

Que con NRZ, equivaldría a una tasa de transmisión por portadora de:

$$fb = 2 \times B = 1767,67 \text{ Mbps}$$

Por lo tanto es necesario el uso de compensadores de la dispersión.

Se necesitan compensar:

$$396 \text{ ps} - 175 \text{ ps} = 221 \text{ ps}$$

Esta compensación de dispersión se hace por medio de los módulos ofrecidos por el fabricante MRV, con referencia EM316DCM50, el cual trabaja en banda C y tiene pérdidas de inserción bajas (por el orden de 3.5 dB), y nos permite realizar la compensación desde el primer canal hasta el último entre -773 y -890 ps/nm.

Para el láser del transmisor (con coherencia espectral de 0,3 nm), el módulo DCM dará una dispersión de:

$$DC_{DCM1 \text{ primer canal}} = Dc_{DCM1} \times \Lambda = -773 \text{ ps/nm} \times 0,3 \text{ nm} = -231,9 \text{ ps}$$

$$DC_{DCM1 \text{ ultimo canal}} = Dc_{DCM1} \times \Lambda = -890 \text{ ps/nm} \times 0,3 \text{ nm} = -267 \text{ ps}$$

Por lo tanto, el enlace en este tramo quedaría compensado para todos los canales, teniendo una dispersión al final de:

$$396 - 231,9 \text{ ps} = 164,1 \text{ ps}$$

$$396 - 267 \text{ ps} = 129 \text{ ps}$$

Con este módulo DCM (DCM 50) lograremos compensar lo suficiente para garantizar la correcta comunicación con el ancho de banda proyectado, ya que el tiempo de subida es menor a 175 ps. Como el módulo introduce una dispersión cromática fija, este se podrá ubicar en el segundo amplificador de línea del enlace Bucaramanga - Cúcuta ubicado en el Km 90. La dispersión acumulada por la fibra en el Km 90, se resta con la dispersión cromática del DCM en esta ubicación y cuando llegue al punto final (Cúcuta) se acumulara de nuevo cierta dispersión cromática, pero permitirá comunicar el enlace con el ancho de banda presupuestado.

$$DC \text{ segmento} = DC_{\text{acumulada}} + DC_{KM90} + DC_{DCM50} + DC_{Km45}$$

$$DC \text{ segmento (mayor)} = 153 \text{ ps} + (6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 90 \text{ Km}) - (773 \text{ [ps/nm]} \times 0,3 \text{ nm}) + (6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 45 \text{ Km})$$

$$DC \text{ segmento (menor)} = 153 \text{ ps} + (6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 90 \text{ Km}) - (773 \text{ [ps/nm]} \times 0,3 \text{ nm}) + (6 \text{ [ps/nmKm]} \times 0,3 \text{ nm} \times 45 \text{ Km})$$

$$DC \text{ segmento (mayor)} = 153 \text{ ps} + 162 \text{ ps} - 231,9 \text{ ps} + 81 \text{ ps} = 164,1 \text{ ps}$$

$$DC \text{ segmento (menor)} = 153 \text{ ps} + 162 \text{ ps} - 267 \text{ ps} + 81 \text{ ps} = 129 \text{ ps}$$

A partir de esto verificamos que el ancho de banda sea mayor al escogido para la transmisión:

$$B = \frac{0,35}{T_s} = \frac{0,35}{164,1 \text{ ps}} = 2,132 \text{ GHz} > 2 \text{ GHz (proyectado)}$$

Cumpliendo con lo estipulado para el proyecto.

IX. EFECTO FWM SOBRE EL ENLACE

Se debe tener en cuenta que el transmisor maneja una potencia de 4 dBm por portadora, lo que es equivalente a:

$$4 \text{ dBm} = 10 \log (P)$$

$$P = 10^{0,4} = 2,511 \text{ mW}$$

Además, como se manejan 16 portadoras ópticas, la potencia Pin sería de:

$$Pin = 16 \times 2,511 \text{ mW} = 40,176 \text{ mW}$$

También es preciso mencionar que la fibra óptica del enlace tiene un coeficiente de dispersión cromática de 6 ps/nmKm.

Con estos parámetros, podemos calcular el espaciamento mínimo entre portadoras para evitar el efecto FWM:

$$\Delta f = 11,65 \times \sqrt{\frac{P_{in}}{D_c}}$$

$$\Delta f = 11,65 \times \sqrt{\frac{40,176 \text{ mW}}{6 \text{ [ps/nmKm]}}}$$

$$\Delta f = 11,65 \times 2,5876$$

$$\Delta f = 30,14 \text{ GHz} < 100 \text{ GHz}$$

Como la banda de guarda entre portadoras se estableció de 100 GHz, el efecto de mezclado de cuatro ondas (FWM) en este enlace no se va a presentar.

X. SIMULACIÓN

Se usó el software de simulación OptiSystem versión 7.0.0.469 del fabricante Optiwave para corroborar los cálculos de presupuesto de potencia y verificar que el BER obtenido sea el adecuado, sobre todo en los puntos de recepción/adición de canales.

Ya que el comportamiento en cuanto a potencia y a dispersión es análogo en cada uno de los hilos de transmisión, la simulación se configuró para un enlace de un solo hilo y en un sólo sentido de transmisión (Bogotá a Cúcuta). Los parámetros iniciales se configuraron de acuerdo al diseño mencionado de la siguiente manera:

Tabla 6. Configuración inicial de simulación.

Name	Value	Units	Mode
Simulation window	Set bit rate		Normal
Reference bit rate	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
Bit rate	400000000	Bits/s	Normal
Time window	6.4e-008	s	Normal
Sample rate	25600000000	Hz	Normal
Sequence length	256	Bits	Normal
Samples per bit	64		Normal
Number of samples	16384		Normal

La configuración del emisor se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Configuración del emisor.

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency	193.05	THz	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Power	4	dBm	Normal
<input type="checkbox"/>	Linewidth	8	MHz	Normal
<input type="checkbox"/>	Initial phase	0	deg	Normal

Para poder simular el BER resultante se estableció un esquema de conexión que consta de un generador de bits de secuencia pseudo-aleatoria, un módulo NRZ, un modulador Mach-Zehnder y por supuesto el Láser emisor, con la configuración descrita.

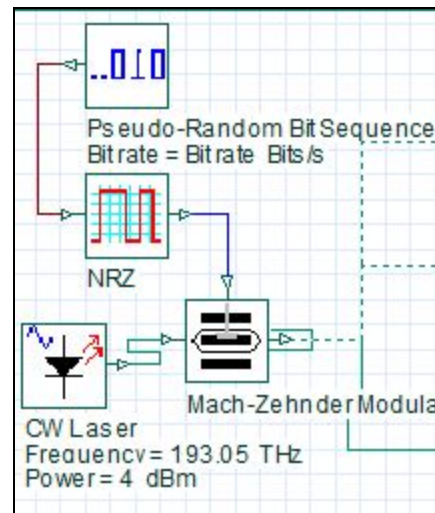


Figura 11. Esquema de conexión para simulación de emisor.

Mientras que, para simular la recepción de información (tanto en terminales como en puntos de extracción e inserción de canales) y comprobar el BER resultante, se utilizó el siguiente esquema de conexión, que consta de un fotodetector (APD), un filtro Bessel pasa bajas de primer orden, un regenerador 3R y un analizador de BER.

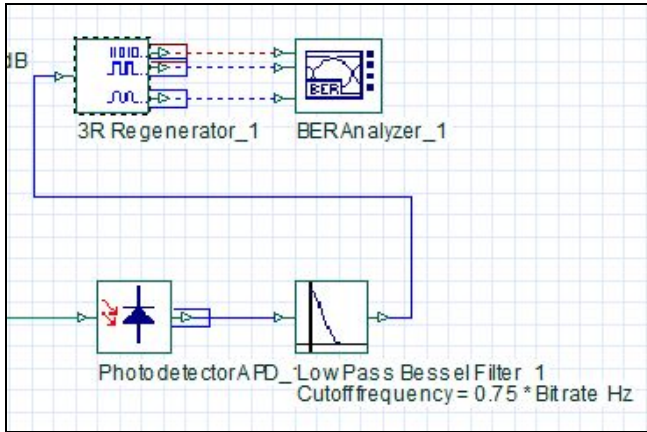


Figura 12. Esquema de conexión para ver resultados de simulación en cuanto a BER.

Mientras que para medidas de potencia, se usaron módulos medidores de potencia óptica y analizadores de espectro óptico.

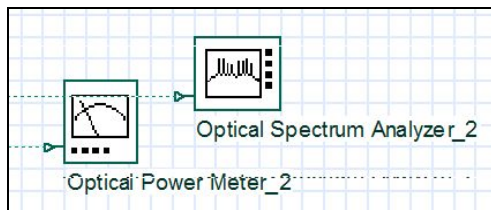


Figura 13. Módulos para medición de potencia en simulación.

El esquema completo se muestra en la imagen del anexo 1, donde se usan módulos de atenuación para representar pérdidas, amplificadores, módulos de fibra óptica con características semejantes a las mencionadas en el diseño, y módulos DCM para compensar dispersión. A continuación se muestran algunas de las configuraciones usadas para estos elementos.

Tabla 8. Ejemplo de configuración de simulación de fibra óptica (Bogotá - San Gil).

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	User defined reference w	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Reference wavelength	1552.93	nm	Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Length	453	km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation effect	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation data type	Constant		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Attenuation	0.3	dB/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Attenuation vs. wavelength	Attenuation.dat		Normal

Tabla 9. Ejemplo de configuración de simulación de módulo DCM.

Disp	Name	Value	Units	Mode
<input type="checkbox"/>	Group velocity dispersion	<input checked="" type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Third-order dispersion	<input type="checkbox"/>		Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion data type	Constant		Normal
<input type="checkbox"/>	Frequency domain parame	<input type="checkbox"/>		Normal
<input checked="" type="checkbox"/>	Dispersion	-2148	ps/nm/km	Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion slope	0.075	ps/nm ² /k	Normal
<input type="checkbox"/>	Beta 2	-20	ps ² /km	Normal
<input type="checkbox"/>	Beta 3	0	ps ³ /km	Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion file format	Dispersion vs. wavelength		Normal
<input type="checkbox"/>	Dispersion file name	Dispersion.dat		Normal

Para el segmento entre Bogotá - San Gil se lograron los siguientes resultados en simulación:



Figura 13. Potencia medida en el punto ubicado en San Gil.

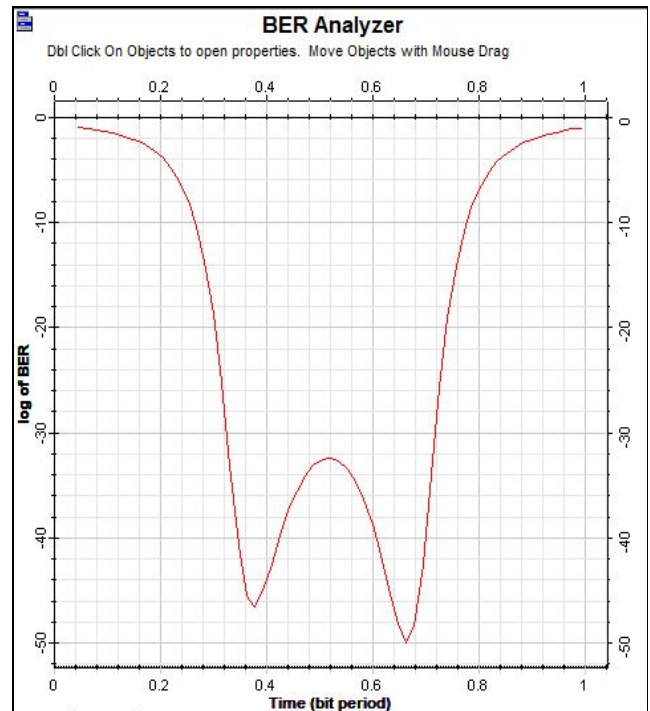


Figura 14. log de BER vs periodo de bit, en el punto ubicado en San Gil.

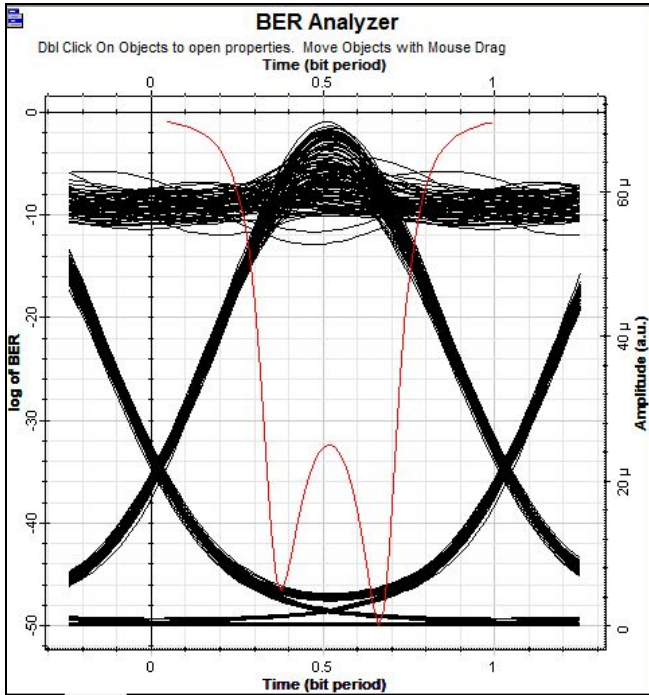


Figura 15. Diagrama de ojo resultante, en el punto ubicado en San Gil.

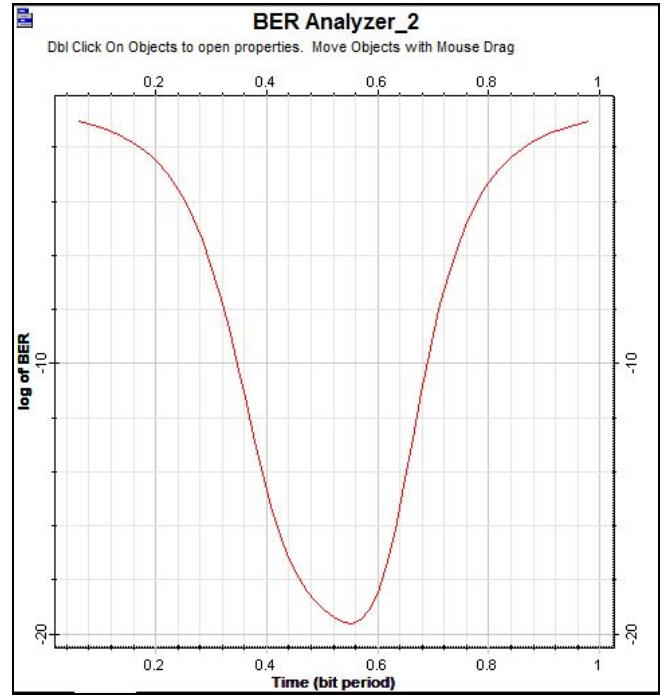


Figura 16. log de BER vs periodo de bit, en el punto ubicado en Bucaramanga.

Los resultados obtenidos en el punto ubicado en Bucaramanga son:



Figura 14. Potencia medida en el punto ubicado en Bucaramanga.

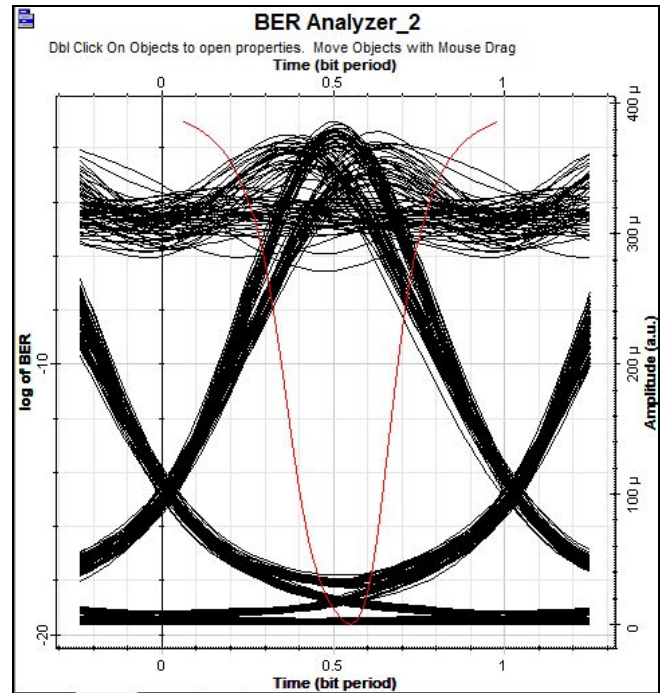


Figura 17. Diagrama de ojo resultante, en el punto ubicado en Bucaramanga.

Y finalmente, para el terminal ubicado en Cúcuta, se lograron los siguientes resultados:

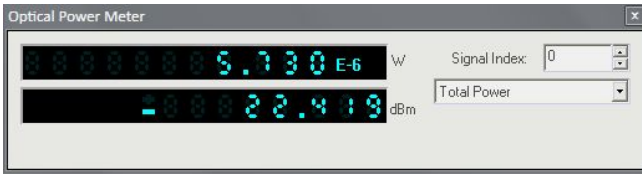


Figura 18. Potencia medida en el punto ubicado en Cúcuta.

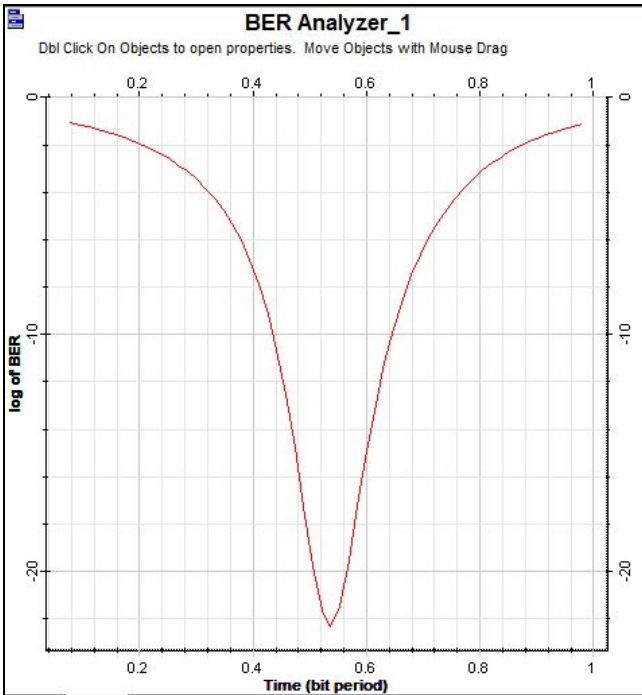


Figura 19. log de BER vs periodo de bit, en el punto ubicado en Cúcuta.

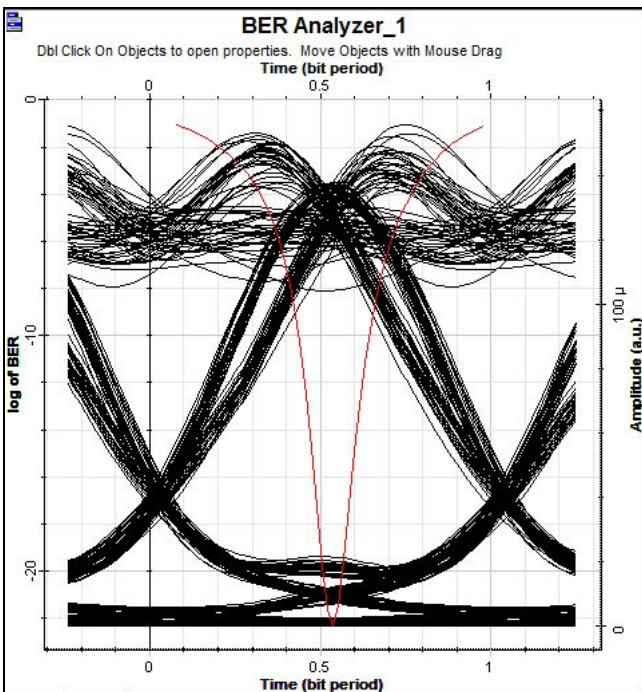


Figura 20. Diagrama de ojo resultante, en el punto ubicado en Cúcuta.

XI. CONCLUSIONES

El diseño de una red óptica de trayecto largo constituye un pilar fundamental en las telecomunicaciones en la actualidad, ya que es el medio de transmisión preferido si se desea una combinación de velocidad de transmisión y fiabilidad. Este documento presentó los aspectos básicos para conformar un diseño inicial de red óptica, pasando por elementos generales como la elección de rutas y dispositivos, y abarcando temas tan específicos como la atenuación y la dispersión de la señal durante el trayecto.

Ya que la fibra óptica que se usó en el diseño es del tipo monomodo, la dispersión de tipo modal es demasiado pequeña como para ser tenida en cuenta en el cálculo del presupuesto de ancho de banda y ya que la tasa de transmisión de cada portadora fue de 4 Gbps (menor a 10 Gbps), la dispersión PMD también es mínima y no se tiene en cuenta en el cálculo de este presupuesto. Considerando este par de situaciones, la dispersión que tendría mayores efectos sobre el enlace es la de tipo cromática.

El diseño y los cálculos teóricos correspondientes a presupuesto de potencia y a presupuesto de ancho de banda permitieron obtener buenos resultados a la hora de implementarlos en el software de simulación, en cada uno de los puntos de interés en la red óptica, como se puede observar en la sección anterior. Se puede notar que el BER resultante en cada caso fue menor a 1×10^{-23} , llegando incluso a tener un BER de aproximadamente 1×10^{-50} en el segmento limitado por los puntos Bogotá - San Gil, lo que garantiza que, al menos con las condiciones de simulación mencionadas, el enlace será capaz de transmitir de manera fiable la información.

Por el lado de potencia de recepción en simulación, siempre se lograron recibir potencias mayores a la de sensibilidad del receptor, sin embargo en el punto ubicado en San Gil se tuvo una potencia de recepción muy cerca del valor límite, causado muy probablemente por las condiciones no ideales de los bloques adicionales usados en la transmisión (Generador de bits, codificador NRZ, Modulador), ya que al quitarlos del esquema de conexión la potencia en dicho punto concordaba con los valores del diseño, pero este esquema no permitía un análisis de presupuesto de ancho de banda de manera simultánea.

A través de los diagramas de ojo en simulación podemos ver que la apertura indica baja probabilidad de que se presente interferencia entre símbolos en este enlace, lo que nos lleva a concluir que el enlace tendría mayor inmunidad frente al ruido. Además, se observa que a medida que nos alejamos del emisor, el diagrama de ojo presenta mayor desviación de fase en el tiempo (Jitter), sin embargo este

efecto no presenta mayores inconvenientes en la transmisión, ya que el BER se mantiene en valores adecuados.

Para un análisis de simulación más completo se requiere conocer elementos más específicos del entorno de implementación de la red óptica, como por ejemplo pérdidas por curvatura, señales interferentes o condiciones de temperatura ambiente, comportamientos de los dispositivos frente a ciertas formas de onda, entre otros.

XII. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

[1] Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Wayne Tomasi, DeVry Institute of Technology Phoenix, Arizona, 4ta edición, Pearson Education.

[2] Optical Fiber Transmission Cap. 28, Anton A. Huurdeman, The Worldwide History of Telecommunications 2003, Wiley-IEEE Press eBook Chapters.

[3]http://www.tfo.upm.es/docencia/2012-13/s1/LCOP/info_general/manual_es_1213_s1.pdf

[4]http://nemesi.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema4/tema4_4.htm

[5] Hoja de datos de fabricante de Transceptor FTLX4213C3, disponible en:
https://www.finisar.com/sites/default/files/downloads/ftlx4213x3xxxx_10g_ethernet_sonet_200km_dwdm_xfp_transceiver_product_spec_rev7.pdf

[6][https://www.finisar.com/optical-transceivers?f\[0\]=field_data_rate_general%3A10G&f\[1\]=field_distance_general%3A%3E100km](https://www.finisar.com/optical-transceivers?f[0]=field_data_rate_general%3A10G&f[1]=field_distance_general%3A%3E100km)

[7] Hoja de especificaciones OADM, disponible en:
<http://www.fs.com/products/57890.html>

[8] Hoja de especificaciones Mux/Demux DWDM, disponible en: <http://www.fs.com/products/50123.html>

[9] Hoja de especificaciones fibra monomodo 24-Fiber ALTOS Gel-Free Cable, Non-Armored SM, disponible en:
<https://www.cableorganizer.com/images/corning/Altos-Cut-Sheet.pdf>

[10]Especificaciones de conectores, disponible en:
<https://www.cableorganizer.com/corning-cables/unicam-premium-single-mode-connectors.html>

[11]Hoja de especificaciones de los amplificadores ópticos, disponible en:
[http://www.eng.ucy.ac.cy/ece455/docs/DataSheets/mrv-fd-edfa_2\(EDFA\).pdf](http://www.eng.ucy.ac.cy/ece455/docs/DataSheets/mrv-fd-edfa_2(EDFA).pdf)

[12]Hoja de especificaciones de módulos DCM, disponible en:
<http://mrv.com/wp-content/uploads/2016/08/MRV-FiberDriver-dcm-ds.pdf>