



**Análisis técnico para la mejora de la capacidad de la red y uso eficiente de los Equipos
Terminales de Línea Submarina (SLTE) asociados al Cable Submarino Venezuelan
Festoon**

Mariana Noreña Vásquez

Informe final para optar al título de Ingeniera de Telecomunicaciones

Semestre de Industria

Asesora Interna

Ana María Cárdenas Soto, PhD

Asesor Externo

Hernán Dario Yepes Montoya,
Msc en Ingeniería de Telecomunicaciones

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería de Telecomunicaciones
Medellín, Antioquia

2024

Cita	Noreña Vásquez Mariana
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] M. Noreña Vásquez, “Análisis técnico para la mejora de la capacidad de la red y uso eficiente de los Equipos Terminales de Línea Submarina (SLTE) asociados al Cable Submarino Venezuelan Festoon”, Semestre de Industria, Ingeniería de Telecomunicaciones, Universidad de Antioquia, Medellín, 2024.



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Eduard Emiro Rodríguez Ramírez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Tabla de contenido

I. Resumen.....	8
II. Introducción	8
III. Objetivos	9
A. Objetivo general.....	9
B. Objetivos específicos	10
IV. Presentación de Padtec	10
V. Marco Teórico	10
A. Historia de la fibra óptica	10
B. Descripción de la fibra óptica	11
C. Fenómenos internos que afectan la transmisión	12
D. Tecnología DWDM	13
E. Tipos de nodos en un sistema DWDM	14
1) Nodo amplificador	14
2) Nodo FOADM	15
3) Nodo OADM	16
4) Nodo ROADM.....	16
F. Red óptica submarina	17
1) Historia del cable submarino	18
2) Estructura del cable submarino	19
3) Evolución del sistema submarino	20
4) Mapa del cableado submarino	21
G. Parámetros de desempeño.....	21
1) Relación señal a ruido óptica (OSNR).....	22
2) Tasa de error de bit (BER)	24
3) Impacto de los efectos no lineales en el OSNR	25
4) Relación señal a ruido óptica generalizada (GOSNR).....	25

5) Relación señal a ruido efectiva (ESNR)	27
6) Factor Q	28
H. VPItransmissionMaker Optical Systems	29
1. Escenario de simulación.....	30
VI. Metodología	31
A. Etapa 1	31
B. Etapa 2	31
C. Etapa 3	31
D. Etapa 4	31
E. Etapa 5.....	31
VII. Resultados y análisis.....	32
A. Información actual de la red Venezuelan Festoon.....	32
1) Topología actual.....	32
2) Distancia de los enlaces	32
3) Información de los amplificadores.....	33
4) Información de las transponders	35
B. Capacidad total bajo condiciones actuales de la red.....	37
C. Puntos de mejora del Festoon	38
D. Análisis para la nueva capacidad alcanzada	40
E. Inversión necesaria para ampliar la capacidad en la red	41
F. Simulación de efectos no lineales en un enlace de dos canales operativos.....	42
G. Simulación de efectos no lineales en un enlace con siete canales operativos	47
H. OSNR necesario para el mínimo valor del Factor Q aceptable a partir de los resultados de simulación.....	50
VIII. Conclusiones.....	52
IX. Referencias Bibliográficas	53
X. Anexos.....	55

A. Anexo 1: Resultados de la simulación de efectos no lineales en un enlace de dos canales	55
B. Anexo 2: Resultados de la simulación de efectos no lineales en un enlace con siete canales	57
C. Anexo 3: Comparación entre el número de canales operativos y el OSNR necesario para alcanzar un determinado valor de Factor Q	59

Lista de figuras

Figura 1: Estructura de la fibra óptica [8]	11
Figura 2: Gráfica de atenuación y dispersión.....	13
Figura 3: Enlace WDM, láseres y receptores ópticos	14
Figura 4: Diagrama sistémico de un nodo amplificador.	15
Figura 5: Diagrama sistémico nodo FOADM	15
Figura 6: Diagrama sistémico de un nodo OADM	16
Figura 7: Diagrama sistémico nodo ROADM.....	17
Figura 8: Infraestructura del cable submarino tomado de [1]	18
Figura 9: Estructura del cable submarino tomado de [9]	20
Figura 10: Tipos de cableado submarino tomado de [12].....	21
Figura 11: Imagen del mapa submarino. Actualizado el 9 de octubre tomado [13] ...	21
Figura 12: Desempeño del OSNR durante la transmisión tomado de [15].....	23
Figura 13: SNR efectivo en función de la potencia por canal tomado de [19]	28
Figura 14: Interfaz del simulador VPI tomado de [18]	29
Figura 15: Ilustración de la transmisión en el escenario de simulación.....	30
Figura 16: Ilustración del ajuste de OSNR en el escenario de simulación	31
Figura 17: Cable Venezuelan Festoon, actualizado el 9 de octubre tomado de [13] ...	32
Figura 18: Topología actual de la red submarina.....	32
Figura 19: Topología y distancia de cada enlace.	33
Figura 20: Tipo de amplificación usado en los enlaces	34
Figura 21: Topología del Festoon con la modulación por enlace	36
Figura 22: Señal muestreada con dos canales, tomado del VPI.....	43
Figura 23: Resultados obtenidos para dos canales a una potencia back-to-back (B2B) de -15dBm.....	44
Figura 24: Resultados obtenidos a una P_{ch} de 10 dBm para dos canales	44
Figura 25: Gráfica BER vs OSNR de los datos de la tabla 7 para dos canales.....	46
Figura 26: Gráfica factor Q vs OSNR tomado de los resultados arrojados por el VPI para distintas potencias de TX con dos canales activos	47
Figura 27: Resultados a una potencia Back-to-Back de -15 dBm para siete canales...	48
Figura 28: Resultados a una P_{ch} de -5 dBm para siete canales.....	48
Figura 29: Resultados a una P_{ch} de 8 dBm para siete canales	49
Figura 30: OSNR vs BER para un enlace de siete canales	50
Figura 31: OSNR vs Factor Q para un enlace de siete canales	50

- Figura 32: Resultados para dos canales con P_{ch} de 0 dBm en un enlace de 223 km.. 55
- Figura 33: Resultados para dos canales con P_{ch} de 2 dBm en un enlace de 223 km.. 55
- Figura 34: Resultados para dos canales con P_{ch} de 4 dBm en un enlace de 223 km.. 56
- Figura 35: Resultados para dos canales con P_{ch} de 6 dBm en un enlace de 223 km.. 56
- Figura 36: Resultados para dos canales con P_{ch} de 8 dBm en un enlace de 223 km.. 57
- Figura 37: Resultados para dos canales con P_{ch} de -3 dBm en un enlace de 223 km 57
- Figura 38: Resultados para dos canales con P_{ch} de 0 dBm en un enlace de 223 km.. 58
- Figura 39: Resultados para dos canales con P_{ch} de 2 dBm en un enlace de 223 km.. 58
- Figura 40: Resultados para dos canales con P_{ch} de 4 dBm en un enlace de 223 km.. 59
- Figura 41: Resultados para dos canales con P_{ch} de 6 dBm en un enlace de 223 km.. 59

Lista de tablas

Tabla 1: Valor de OSNR para diferentes tasas y formatos de modulación	24
Tabla 2: Distancia en kilómetros de los enlaces que conforman el Festoon	33
Tabla 3: Potencia de transmisión y recepción de las amplificadoras y atenuación total de cada enlace.....	34
Tabla 4: OSNR, Factor Q y tasa de modulación por enlace	36
Tabla 5: Potencia por canal y número de canales usados actualmente según enlace...	37
Tabla 6: Número máximo de canales permitidos.....	38
Tabla 7: Presupuesto necesario para ampliar la inversión de la red.....	42
Tabla 8: Tasa de error de bit vs OSNR para un enlace de 223km	45
Tabla 9: Diferencia de OSNR acorde a la potencia de transmisión para un Factor Q = 7 dBQ	51
Tabla 10: Diferencia de OSNR acorde a la potencia de transmisión para un Factor Q = 7.5 dBQ	59
Tabla 11: Diferencia de OSNR acorde a la potencia de transmisión para un Factor Q = 8 dBQ	60

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ASE	Emisión espontanea amplificada
AWGN	Ruido gaussiano blanco auditivo
BER	Tasa de erro de bit
BOA	Amplificador óptico de banda ancha
DCM	Compensador de dispersión cromática
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
ESNR	Relación señal a ruido óptica efectiva
FEC	Forwarding Error Correction
FOADM	Multiplexor óptico fijo de agregación y desagregación
FWM	Mezcla de cuatro ondas
GAWBS	Dispersión guiada de ondas acústico-ópticas
GOSNR	Relación señal a ruido óptica generalizada
HOA	Amplificador óptico híbrido
LOA	Amplificador óptico de línea
NL	No linealidades
OADM	Multiplexor óptico de agregación y desagregación
OSNR	Relación señal a ruido óptica
ROADM	Multiplexor óptico de agregación y desagregación reconfigurable
SDM	Multiplexación por división de espacio
SLTE	Equipos Terminales de Línea Submarinos
SPM	Modulación de fase inducida
VPI	Virtual Photonics Incorporated

WSS Wavelength Selective Switches

XPM Modulación de fase cruzada

I. Resumen

Bajo un escenario de creciente demanda de tráfico en las redes de telecomunicaciones, optimizar la cantidad de información que se puede transportar sobre una infraestructura existente se convierte en un factor decisivo tanto en el modelo de negocios como en la continuidad de la compañía dueña de la infraestructura. Hace dos décadas, se tomaron decisiones sobre la selección del tipo de fibra considerando únicamente las limitaciones de la tecnología de la época, como lo fue la utilización de fibra G.653 debido al impacto de la dispersión cromática en los sistemas SDH. En la actualidad, estas decisiones limitan en gran medida el aumento de las capacidades de las redes de nueva generación.

El objetivo principal del trabajo fue comprender cómo la potencia por canal, el número de canales operativos en el enlace, la tasa, el formato de modulación, entre otros factores, interactúan y afectan el desempeño del sistema. A través del análisis de datos y simulaciones, se logró obtener resultados que mostraron el impacto en el rendimiento y la calidad de la señal al aumentar de la potencia por canal, esto debido a los efectos no lineales que se presentan en un medio de propagación como la fibra óptica. Los resultados permitieron visualizar la degradación de la relación señal a ruido óptica (OSNR) debido a la predominancia de las no linealidades que agravan el desempeño de la red en entornos de alta capacidad limitando el crecimiento de la red.

Palabras claves: Enlace submarino, DWDM, efectos no lineales, potencia, modulación, OSNR, capacidad de transmisión

II. Introducción

Las comunicaciones submarinas han desempeñado un papel fundamental en las telecomunicaciones desde el siglo XIX con la instalación del primer cable submarino telegráfico, cuyo propósito consistía en comunicar Francia e Inglaterra. Este hito histórico marco el comienzo de la innovación de las transmisiones a larga distancia permitiendo reducir considerablemente la latencia entre continentes.

La tecnología empleada en los cables submarinos ha avanzado considerablemente, lo que hoy en día hace posible la transmisión de grandes volúmenes de datos. El avance más significativo se dio con la creación de la fibra óptica, que permitió la transmisión de datos a velocidades más altas y con una menor pérdida de potencia de señal. En la actualidad, los sistemas submarinos son el pilar de las comunicaciones en el nivel mundial dado que

transportan más del 90% del tráfico internacional incluyendo llamadas telefónicas, flujo de datos de internet y mensajería. La investigación constante en esta área ha facilitado el aumento de la capacidad y la fiabilidad de los sistemas existentes. Igualmente, la expansión de las redes submarinas ha permitido incluir regiones remotas a la infraestructura global de telecomunicaciones. [1]

Una de las principales problemáticas de los sistemas submarinos corresponde a las vulnerabilidades físicas a las que están constantemente expuestos los cables empleados ya que actividades como el anclaje de barcos y eventos naturales como maremotos ocasionan graves daños a la infraestructura [2]. Otro desafío corresponde a la instalación y mantenimiento de los cables. La implementación requiere una inversión económica substancial en equipos especializados y tendido del cable submarino. De igual manera, el mantenimiento continuo del sistema y la reparación de daños representan gastos adicionales. Los daños interrumpen las comunicaciones por extensos periodos de tiempo, donde en la gran mayoría de casos, es necesario implementar cables nuevos para solventar la interrupción de los servicios.

Este trabajo tiene como objetivo analizar una sección de la red actual del cliente NET que está conformada por cables submarinos y, así, determinar las mejoras necesarias para aumentar su capacidad. El estudio se centrará en identificar la ocupación actual en términos de espectro óptico, estado de los enlaces y la inversión total requerida para garantizar un mejor desempeño. Sumado a esto, se llevará a cabo la simulación del sistema para visualizar el impacto de los efectos no lineales en la transmisión de la información bajo condiciones actuales. Cabe mencionar que, la implementación de estas mejoras contribuirá significativamente a la estabilidad y eficiencia de la red en un futuro.

III. Objetivos

A. Objetivo general

Realizar un análisis técnico del estado actual del desempeño de la red y de los Equipos Terminales de Línea Submarinos (SLTE) del cable submarino Venezuelan Festoon mediante la medición de parámetros de desempeño como capacidad, OSNR y Factor Q, con el fin de proyectar una mejora en su capacidad total de transmisión y los costos estimados que esto conlleva.

B. Objetivos específicos

- Recopilar información sobre el estado de la red y de los SLTE implementados actualmente en el cable submarino Venezuelan Festoon.
- Elaborar un reporte de cálculo de la capacidad total bajo condiciones actuales del cable teniendo en cuenta el OSNR, Factor Q y estado de calibración de la red.
- Estimar la capacidad objetiva futura que se puede alcanzar con el cable mediante la identificación de puntos de mejora de la red.
- Calcular la inversión total que se necesitaría para lograr la capacidad objetivo del cable.

IV. Presentación de Padtec

Padtec S.A es una multinacional brasileña fundada en 2001 cuya sede principal se encuentra en Campinas, São Pablo. La empresa provee soluciones flexibles de alta capacidad para transmisiones ópticas de larga distancia basadas en tecnología Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM). Padtec ofrece una amplia cartera de productos para redes que atienden demandas de extremo a extremo de grandes operadores, integradores, carrier de carriers, proveedores de servicios y otros. Además, como resultado de una fuerte vocación por la investigación y el desarrollo, la tecnología pionera de la empresa recorre grandes distancias y desafía límites para conectar el mundo de manera inteligente. [3]

V. Marco Teórico

A. Historia de la fibra óptica

Desde las primeras investigaciones en 1950, la fibra óptica ha sido uno de los avances más revolucionarios en las comunicaciones por cable ya que este medio ha permitido establecer comunicaciones de corta y larga distancia, garantizando bajas pérdidas, baja latencia y altas capacidades [4]. El desarrollo de la fibra óptica dio un gran salto gracias a la invención del láser a finales de los años 50, sin embargo, su adopción inicial fue limitada debido a la alta atenuación que presentaba, con un valor de alrededor de 20 dB/km. Para 1966, el Dr. Charles Kao junto con George Hockham propusieron que la fibra óptica podría ser un medio viable de transmisión para comunicación de largas distancias, siempre y cuando la fibra óptica alcanzara niveles de atenuación inferiores a los 20 dB/km [4, 5].

Para superar el obstáculo de la alta atenuación en la FO, las investigaciones posteriores se enfocaron en reducirla a través de la eliminación de impurezas en el vidrio utilizado en el proceso de fabricación. Estos avances permitieron que la FO alcanzará niveles de atenuación mucho más bajos junto con transmisiones más eficientes, transformándola en el medio de comunicación más empleado en la actualidad.

B. Descripción de la fibra óptica

La fibra óptica (FO) está compuesta por tres elementos fundamentales: el núcleo, el revestimiento y la cubierta. El núcleo contiene un filamento delgado de vidrio de alta pureza, o de plástico, que permite la transmisión de la luz. Alrededor del núcleo se encuentra el revestimiento, una capa que funciona como una barrera para evitar que la luz se desvíe, reduciendo las pérdidas en la señal. Por último, la cubierta externa rodea y protege de factores externos tanto al núcleo como al revestimiento, asegurando la durabilidad de la fibra en diversas condiciones. Ver figura 1 para una mejor comprensión de las partes.

La transmisión de la luz se fundamenta en el principio de reflexión total interna, el cual permite que el haz de luz quede completamente confinado en el núcleo. El confinamiento es posible porque el núcleo tiene un índice de refracción mayor que el revestimiento, lo que facilita que el haz incida sobre la superficie de separación con el revestimiento con un ángulo igual al ángulo crítico. De esta manera, la luz se refleja internamente en lugar de salir al revestimiento, asegurando que se propague a lo largo de la fibra sin pérdidas significativas. [6, 7]

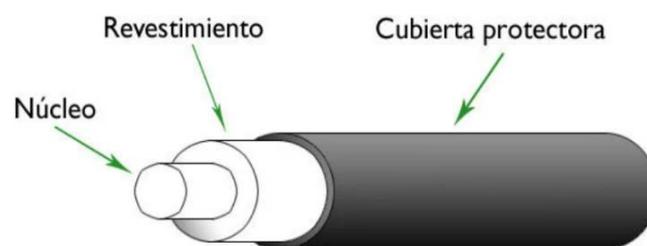


Figura 1: Estructura de la fibra óptica [8]

Según el modo de propagación, existen dos tipos principales de FO: monomodo y multimodo. Las fibras monomodo son aquellas que presentan un diámetro de núcleo pequeño, alrededor de $9\ \mu\text{m}$, a través del cual se propaga un único modo de luz. Son empleadas en transmisiones de larga distancia puesto que poseen baja atenuación y ofrecen un mayor ancho de banda siendo estas características ideales para aplicaciones de alta capacidad y largas distancias. En cambio, las fibras multimodo cuentan con un núcleo de mayor diámetro,

generalmente alrededor de 50 μm , permitiendo la propagación de múltiples modos de luz. Son utilizadas en transmisiones de corta distancia porque presentan mayor dispersión, limitado ancho de banda a ciertas longitudes de onda. [5, 7]

C. Fenómenos internos que afectan la transmisión

Dentro de la fibra óptica, ocurren ciertos fenómenos que influyen en la calidad de la transmisión de luz. Uno de los fenómenos principales es la atenuación que depende de la longitud de onda de operación y causa pérdidas de señal a medida que la luz viaja a lo largo de la fibra. Otro fenómeno relevante corresponde a la dispersión, la cual se clasifica en dispersión modal, dispersión cromática y dispersión por modo de polarización

La dispersión modal es propia de las fibras multimodo. En este tipo de dispersión, los modos de propagación viajan por trayectorias distintas en el núcleo ocasionando diferentes tiempos de llegada para cada pulso de luz. Para sistemas de larga distancia, este fenómeno genera bajo rendimiento por la superposición de señales desfasadas en tiempo. La dispersión cromática se refiere al ensanchamiento de la señal debido a que cada longitud de onda percibe un índice de refracción ligeramente distinto haciendo que los componentes de la luz viajen a velocidades desiguales. Finalmente, la dispersión por modo de polarización es un fenómeno propio de las fibras monomodo que ocurre porque la fibra no es completamente simétrica, lo que hace que ambos modos de polarización de la luz se propaguen a velocidades diferentes provocando un ensanchamiento adicional en la señal. Este tipo de dispersión, aunque es generalmente bajo, se torna relevante para enlaces de alta capacidad y largas distancias. [5, 7]

Por último, están los efectos no lineales como la modulación de fase inducida (SPM), modulación de fase cruzada (XPM), mezcla de cuatro ondas (FWM), entre otros. Estos efectos pueden impactar considerablemente el rendimiento del sistema, especialmente en escenarios de alta potencia como en sistemas de multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM). La SPM ocurre cuando un pulso de luz modula su propia fase debido a variaciones de intensidad, mientras que la XPM se presenta cuando un canal modula la fase de otro canal por la interacción de sus campos. La FWM, por su parte, induce a la generación de nuevas señales ópticas cuando dos o más canales de diferente longitud de onda interactúan en el medio de propagación. Estos efectos pueden distorsionar la señal y degradar su calidad, por lo que es crucial limitar la potencia de transmisión y seleccionar cuidadosamente el tipo de fibra monomodo a utilizar en el sistema para mitigar los efectos no deseados. [5, 7, 8]

En la figura 2 se observa la curva de atenuación y la curva de dispersión. La curva de atenuación es similar para todos los tipos de fibra y varía de acuerdo con la longitud de onda. En la figura mencionada, se tiene la gráfica de dispersión para los siguientes tipos de fibra: G.652D, G.653 y G.655. El rango de longitudes de onda se segmenta en diferentes bandas conocidas como O (1260 nm -1360 nm), E (1360 nm – 1460 nm), S (1460 nm – 1530 nm), C (1530 nm – 1565 nm), L (1565 nm – 1625 nm) y U (1625 nm – 1675 nm), cada una con características específicas y aplicaciones determinadas. En los sistemas DWDM, se utiliza la banda C ya que en esta banda opera el amplificador de fibra dopado con Erbio (EDFA), un dispositivo clave en sistemas de larga distancia.

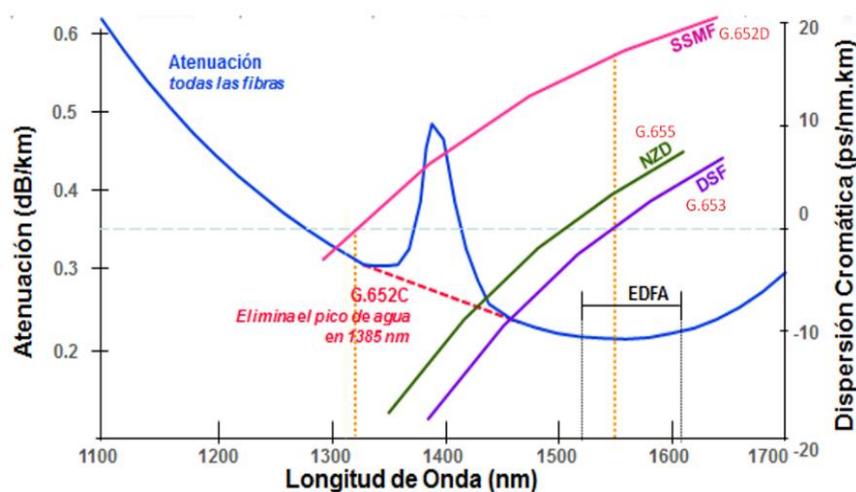


Figura 2: Gráfica de atenuación y dispersión

D. Tecnología DWDM

DWDM es una tecnología que permite acoplar diversas longitudes de onda en una única fibra para su transmisión con el fin de aumentar la capacidad de la red sin tender fibras adicionales por cada nueva conexión que se tenga, ver figura 3. En los sistemas DWDM se tienen elementos muy importantes para el correcto funcionamiento donde cada uno desempeña un rol determinado tales como: transponder, módulos plugables, multiplexor, compensadores de dispersión cromática (DCM), amplificadores EDFA y Raman, Wavelength Selective Switches (WSS), acopladores ópticos, entre otros. Además, este tipo de sistema tiene la ventaja de ser flexible y escalable en el tiempo ya que se puede aumentar la capacidad sin tener que cambiar toda la infraestructura instalada.



Figura 3: Enlace WDM, láseres y receptores ópticos

Por otro lado, la capacidad del sistema depende de la relación señal a ruido óptica (OSNR) que se alcanza, este valor es acumulable y se calcula con la potencia de entrada a cada amplificador EDFA que se tenga en el trayecto de fibra. Adicionalmente, el OSNR ayuda a determinar el formato de modulación que podría usar el sistema. Se debe tener presente que, si se quiere alcanzar una alta capacidad, el formato de modulación debe ser mayor y, por ende, el OSNR debe tener un valor más alto.

E. Tipos de nodos en un sistema DWDM

1) Nodo amplificador

El nodo amplificador es ampliamente utilizado en las redes DWDM debido a que contribuye en el alcance de largas distancias compensando la atenuación de la señal óptica. La figura 4 ilustra un tipo de nodo amplificador en el cual se usa amplificadores híbridos (HOA) que están compuestos por un amplificador EDFA más un amplificador Raman en recepción. No obstante, existen otras configuraciones de nodo amplificador usando solo amplificadores EDFA o amplificadores de línea (LOA) junto con amplificador óptico de banda ancha (BOA).

Este nodo recibe la señal DWDM entrante y la amplifica, aumentando considerablemente la potencia para continuar su transmisión en la distancia restante del enlace. Este incremento de potencia permite que la señal llegue más lejos conservando una buena OSNR, lo que ayuda a preservar la calidad de la transmisión y reducir la degradación en el trayecto.

Para el caso mostrado en la figura 4, el comportamiento de la señal varía según la dirección del enlace. En el sentido de transmisión, la señal interactúa exclusivamente con un amplificador EDFA. Sin embargo, en el sentido de recepción, la señal primero pasa a través de un amplificador Raman y luego por un EDFA, siempre que el Raman esté activo. Esta configuración híbrida ayuda a la optimización de la amplificación en la recepción ya que

proporciona una ganancia inicial que puede mejorar la relación señal a ruido óptica (OSNR) antes de pasar por el EDFA.

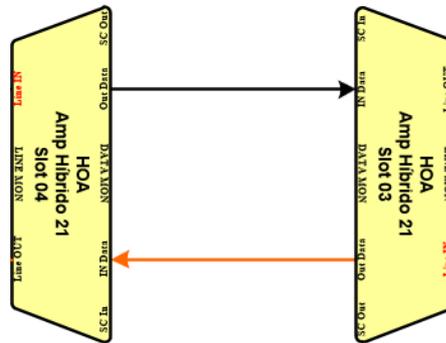


Figura 4: Diagrama sistémico de un nodo amplificador.

2) Nodo FOADM

El nodo FOADM, multiplexor óptico fijo de agregación y desagregación, está conformado por el enfrentamiento de dos multiplexores ópticos con el fin de agregar, desagregar y conmutar canales físicamente de un nodo a otro, como se muestra en la figura 5. En este tipo de nodo no se cuenta con la posibilidad de realizar las funciones descritas de manera remota, sino que se debe contar con un desplazamiento al nodo para realizar las conexiones físicas pertinentes. En la figura, las tarjetas correspondientes a los canales 21, 22 y 26 representan transponders, ilustrando la funcionalidad de agregación y desagregación de canales en el nodo. Además, este nodo puede incorporar las tarjetas amplificadoras descritas anteriormente para compensar las pérdidas de inserción de los multiplexores.

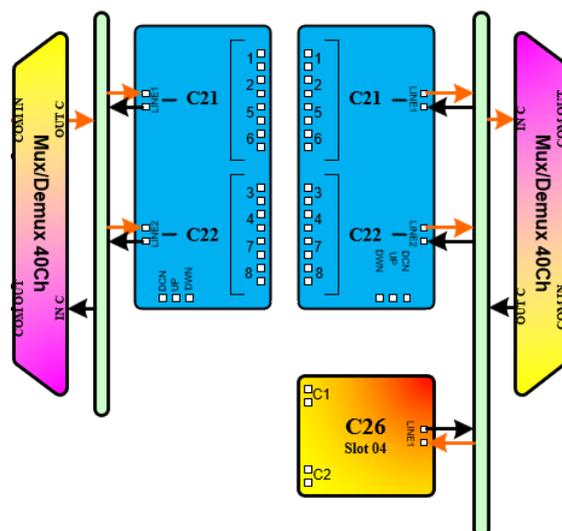


Figura 5: Diagrama sistémico nodo FOADM

3) *Nodo OADM*

El nodo OADM, multiplexor óptico de agregación y desagregación, cumple las mismas funciones que un nodo FOADM con la salvedad que no se requiere la manipulación física de los canales para ser conmutados a otro nodo. La tarjeta OADM contiene una agregación y desagregación fija de cierto número de canales, por ejemplo, en la figura 6, se utiliza un OADM de 8 canales (canal 21 a canal 28), quiere decir que los 8 canales se agregan o desagregan en este nodo y el resto de canales son enrutados hacia otra dirección. Cabe aclarar, que en este nodo se puede incluir tarjetas amplificadoras para compensar las pérdidas de inserción del OADM como se muestra en la figura 6.

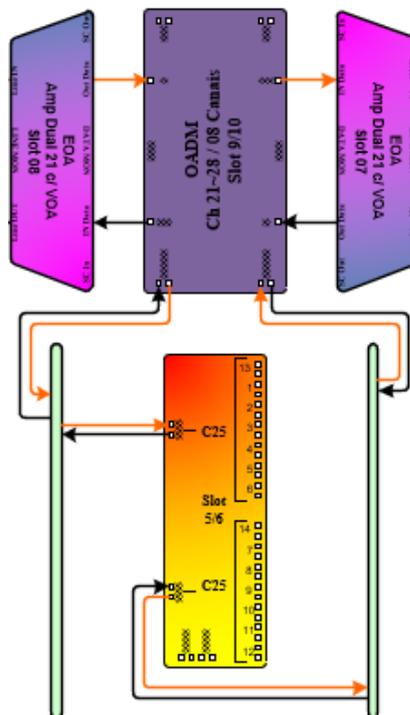


Figura 6: Diagrama sistémico de un nodo OADM

4) *Nodo ROADM*

Un nodo ROADM, multiplexor óptico de agregación y desagregación reconfigurable, facilita la agregación, desagregación y conmutación de canales de servicios mediante una configuración remota en lugar de una intervención manual, gracias a un componente conocido como Wavelength Selective Switch (WSS) usado en este tipo de nodo. El WSS permite la manipulación de las señales ópticas al seleccionar, enrutar y bloquear longitudes de onda de un trayecto a otro de manera automática y remota. Los tipos de tarjetas WSS dependen del número de vías que estas tengan, las cuales, pueden ser de 4 o 9 vías. En la figura 7, se muestra la

infraestructura de un nodo ROADM que puede incluir tarjetas amplificadoras para compensar las pérdidas de inserción de la WSS. Allí se observa otros tipos de tarjetas tales como IPP y OCM. La tarjeta IPP facilita la interconexión de una WSS con las existentes en el nodo. Por otro lado, el OCM permite visualizar el comportamiento de todos los canales que llegan o pasan por la WSS a la que está conectado.

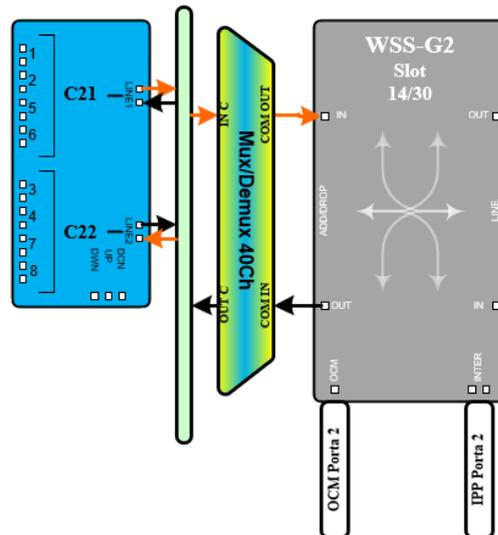


Figura 7: Diagrama sistémico nodo ROADM

F. Red óptica submarina

La red óptica submarina es un sistema que emplea la fibra óptica como medio de transporte para transmitir información a través de océanos y mares. Este sistema conecta ciudades y continentes permitiendo la transferencia de grandes volúmenes de datos, por ello, en este tipo de infraestructura se garantiza un ancho de banda significativo y bajas latencias. Una red submarina está conformada principalmente por planta seca (Dry plant) y planta húmeda (Wet plant), como se observa en la figura 8. La planta seca está compuesta por los equipos terminales tales como el transponder, conductor de energía y otros. Por su parte, la planta húmeda se compone del cable de fibra óptica, repetidores y las unidades de derivación. [1]

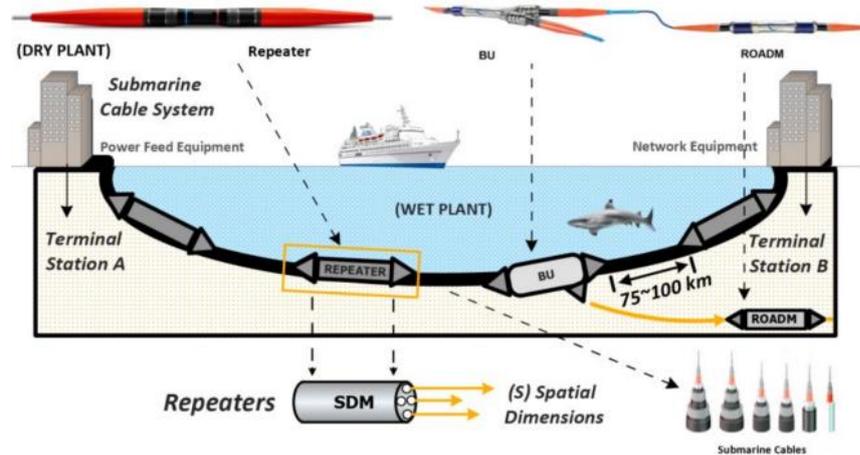


Figura 8: Infraestructura del cable submarino tomado de [1]

1) Historia del cable submarino

El cable submarino se ha convertido en una de las evoluciones más importantes de las telecomunicaciones que contribuye hoy en día a la interconexión de países y continentes, permitiendo la transmisión de grandes volúmenes de datos en largas distancias.

Los primeros cables submarinos fueron tendidos en el siglo XIX y se emplearon para transportar señales telegráficas. El primer cable conectó Francia e Inglaterra a través del estrecho de Dover en 1850, sin embargo, esta conexión no duró mucho puesto que el cable fue dañado al poco tiempo de ser instalado. En los años posteriores, se realizaron varios tendidos en Inglaterra, Irlanda, el mediterráneo y otros lugares, no en todos los casos fue exitoso, pero esto permitió ganar experiencia sobre el cable submarino y comprender la durabilidad de los materiales que eran usados en aquella época. [9, 10]

Luego de demostrar la viabilidad de la tecnología submarina frente a la comunicación terrestre tradicional, se lanzó un proyecto promovido por Samuel Morse, Cyrus West Field y Frederick Newton Gisborne que consistía en tender un cable submarino trasatlántico entre Irlanda y Terranova. El cable que usaron estaba conformado por alambres de cobre recubiertos de tres capas de gutapercha, aislante natural obtenido del árbol palauquium, y blindado por hilos de acero. Tras varios intentos fallidos, en 1958 se logró completar el sistema submarino desde la bahía de Trinity (Terranova) y la bahía de Valentia (Islandia). El primer mensaje transmitido en este sistema se logró el 16 de agosto de 1858 y contenía la siguiente frase: “Gloria a Dios en el cielo, paz a en la Tierra a los hombres de buena voluntad”. A pesar del desempeño del cable, la latencia en la transmisión de la información era exageradamente enorme, por lo cual, en el

intento de mejorar el rendimiento del sistema, el cable comenzó a deteriorarse a grandes pasos hasta el punto de ser inutilizable a tan solo pocas semanas de su instalación. [9, 10]

En 1866 se tendió un nuevo cable submarino trasatlántico que era más robusto y con mejor aislamiento al empleado en 1858. De igual manera, este cable obtuvo un rendimiento más estable ya que transmitía información con latencias muy inferiores a su antecesor, logrando enviar datos en un par de horas. [2, 10]

Durante el siglo XX, la humanidad se enfrentó a la necesidad de mejorar la tecnología submarina gracias a la invención del teléfono. Los cables submarinos existentes en aquel tiempo no eran adecuados para transmitir señales de voz ya que fueron creados para enviar únicamente señales telegráficas. En 1956 se instaló el primer cable submarino telefónico trasatlántico, llamado TAT-1 que conectó Escocia y Terranova. Poco después, llegó el cable TAT-2 debido a la creciente demanda de tráfico. Este segundo cable fue un proyecto realizado en conjunto por los gobiernos de Alemania y Francia, y el operador AT&T en Estados Unidos y Canadá. Estos primeros cables modernos fueron diseñados a base de cable coaxial para reducir interferencias y lograr mayores distancias. [2, 10].

A finales del siglo XX, con la introducción de la fibra óptica en las comunicaciones, se reemplazó el cable coaxial en los sistemas submarinos por esta tecnología emergente. La fibra óptica, como se ha mencionado, permitió la transmisión de alta capacidad de datos garantizando menores latencias en los sistemas, lo cual, ha sido un factor favorable en su implementación en las redes de comunicaciones. En la actualidad, se cuenta con más de 400 cables submarinos operativos alrededor del mundo siendo el principal componente de la infraestructura de internet. [2]

2) Estructura del cable submarino

El cable submarino está conformado principalmente por hilos de fibra óptica, los cuales, se encuentran protegidos por un recubrimiento y un tubo de cobre o aluminio. Seguidamente, se cuenta con una barrera de aluminio resistente al agua en caso tal se tenga filtración de esta sustancia hacia el interior del cable. Adicionalmente, se tiene una armadura de alambres de acero que garantiza mayor protección e integridad del cable y, en la última capa, se encuentra un recubrimiento de polietileno que corresponde a la protección final de los hilos de fibra frente a las adversidades del medio en el que sea situado. El cable suele tener capas de protección

adicionales cuando se ubica en zonas aledañas a las costas ya que existe una mayor probabilidad de daños debido a la presencia de anclas. [9, 11]

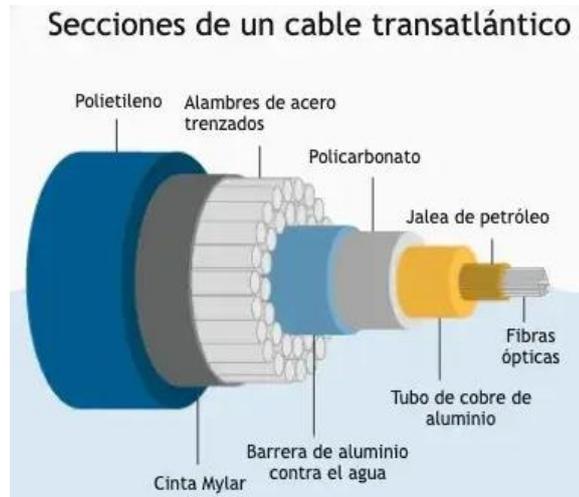


Figura 9: Estructura del cable submarino tomado de [9]

3) Evolución del sistema submarino

En la figura 10, se aprecia los tipos de sistemas submarinos respecto a la planta húmeda. La imagen superior izquierda muestra el sistema con dispersión controlada usado en años anteriores al 2010, la dispersión se compensaba alternando longitudes de fibra con dispersión positiva y negativa dentro del tramo de cable submarino. Del 2014 en adelante, imagen superior derecha, se comenzó a utilizar cables de fibra no compensados caracterizados por tener alta dispersión positiva, este tipo de cable presentaba una atenuación inferior a 0.15 dB/Km , mayor área efectiva, potencia de bombeo alta para los repetidores, entre otras características. A partir del 2020, se empezó a usar la tecnología SDM (Space Division Multiplexing) que sirve para aumentar la capacidad permitiendo que múltiples canales sean transmitidos a través de diferentes canales físicos en una sola fibra o en varias fibras ópticas. Adicionalmente, en SDM es usual encontrar fibras multinúcleo y fibras de pocos modos para la transmisión de datos ya que incrementa la capacidad sin necesidad de agregar más fibras físicas. Por último, en la imagen inferior izquierda se tiene el sistema Festoon, es una red que presenta enlaces cortos con el objetivo de minimizar el uso de cableado eléctrico y repetidores a lo largo de la trayectoria de la planta húmeda. [1, 12]

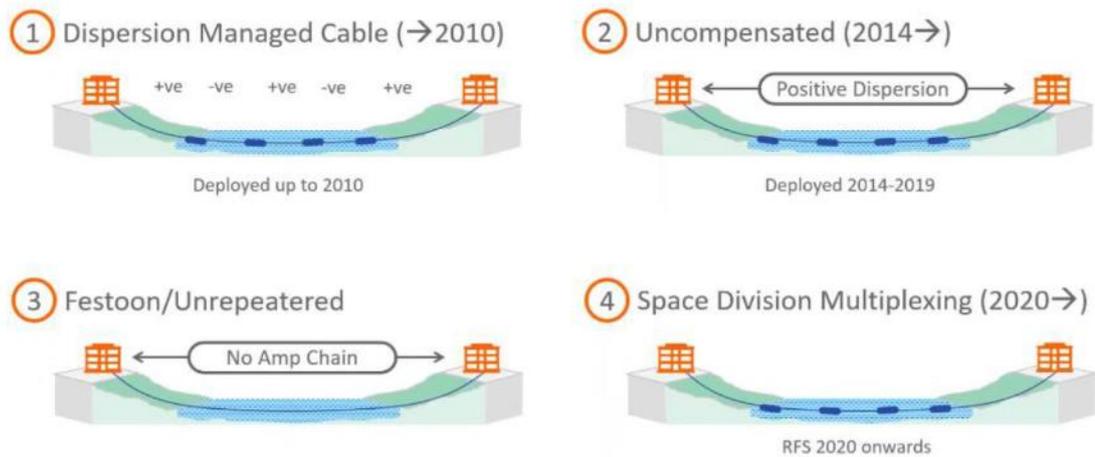


Figura 10: Tipos de cableado submarino tomado de [12]

4) Mapa del cableado submarino

El mapa del cableado submarino, figura 11, es una herramienta gráfica de la infraestructura a nivel global de los sistemas submarinos, el cual, representa una aproximación de la situación actual del cableado existente. A través de esta herramienta, se puede extraer información acerca del nombre y propietario de la red, la ubicación de los cables, las rutas que estos siguen y la distancia total del sistema.

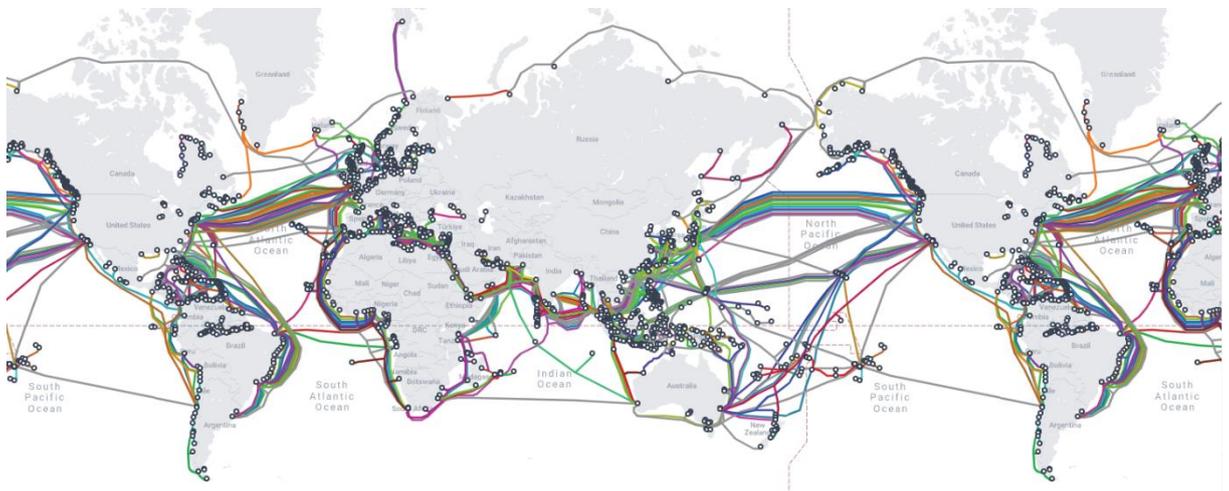


Figura 11: Imagen del mapa submarino. Actualizado el 9 de octubre tomado [13]

G. Parámetros de desempeño

El desempeño de la red óptica está determinado bajo un conjunto de parámetros que reflejan la calidad de la señal a través de los enlaces. Estos parámetros no solo permiten evaluar el estado actual de la red, sino que además facilitan la identificación de problemas y puntos de

mejora del sistema para lograr responder positivamente frente a la creciente demanda de tráfico en el mundo. Mediante el análisis de los parámetros, las empresas de telecomunicaciones están en la capacidad de garantizar el funcionamiento adecuado de la red dentro de los estándares establecidos. [14]

1) Relación señal a ruido óptica (OSNR)

El OSNR es una medida de la calidad de la señal que mide la relación entre la potencia de la señal óptica y la potencia del ruido óptico. Este parámetro se toma a la entrada de cada amplificador dopado con erbio, EDFA, presente en el enlace. La ecuación 1 y 2 permite determinar el SNR óptico a la entrada de un EDFA. La ecuación 2 resulta al aplicar el logaritmo de la ecuación 1, brindando una forma más sencilla de calcular e interpretar el OSNR.

$$OSNR = \frac{P_{in}}{N_F h\nu \Delta f} \quad (1)$$

$$OSNR(dB) = P_{in}(dBm) - NF(dB) + 58 \quad (2)$$

En la ecuación 1, N_F representa la figura de ruido del EDFA, $h\nu$ es la energía de un fotón, Δf es el ancho de banda óptico igual a 12,5 GHz y P_{in} es la potencia que entra al amplificador. Por su parte, la ecuación 2 es el resultado de aplicar el logaritmo base 10 sobre la ecuación 1. $P_{in}(dBm)$ representa la potencia de entrada al EDFA en dBm, NF corresponde a la figura de ruido del amplificador y la constante 58 es un valor previamente establecido para una longitud de onda de 1550 nm con un ancho de banda igual a 0.1 nm, dicha constante se debe a la operación del logaritmo del producto entre la constante de Plank, la frecuencia asociada a la longitud de onda existente y el ancho de banda Δf medido en dB.

La figura 12 evidencia el comportamiento tanto de la señal como del ruido durante el proceso de amplificación en una topología típica DWDM. Nótese que el EDFA amplifica cualquier señal que reciba sin distinción alguna, además, adiciona ruido al ya existente debido a un proceso conocido como emisión espontánea amplificada (ASE). Este tipo de emisión sucede debido a la excitación de iones de Erblio que, por minimización de energía, regresan a su estado de manera espontánea emitiendo fotones en banda C (1500 – 1570 nm) ocasionando el aumento del nivel de ruido en la señal óptica de interés debido a que estos fotones también son amplificados durante el proceso en cuestión. Por tal motivo, la señal se degrada cada que pasa a través de un amplificador EDFA. Así, si el sistema utiliza N amplificadores, es posible

calcular el OSNR acumulado al final del sistema empleando la ecuación 3, donde $OSNR_N$ indica la relación señal a ruido óptica para cada uno de los amplificadores:

$$OSNR_{acumulado}(dB) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\frac{1}{OSNR_1(dB)} + \frac{1}{OSNR_2(dB)} + \dots + \frac{1}{OSNR_N(dB)}} \right) \quad (3)$$

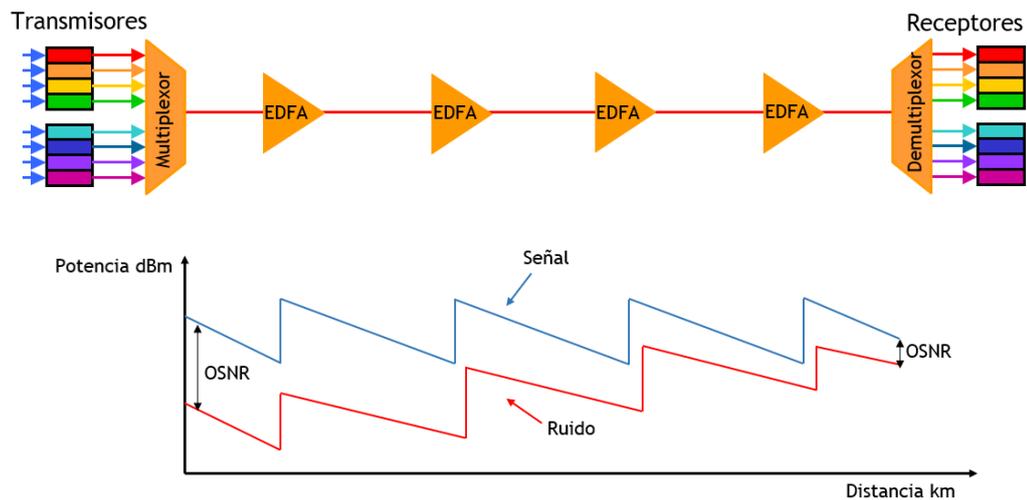


Figura 12: Desempeño del OSNR durante la transmisión tomado de [15]

En las ecuaciones 2 y 3, se observa el decibel como unidad de medida de OSNR, esto se debe a que las señales tienen un amplio rango dinámico para ser expresadas en vatios, por ende, se expresan en unidades logarítmicas para una mejor comprensión de los valores.

La OSNR es un factor crítico para determinar la tasa de transmisión que un sistema puede soportar. La siguiente tabla muestra el mínimo valor de OSNR necesario para alcanzar cierta tasa, dependiente del formato de modulación, rejilla mínima y bits/símbolo. La rejilla mínima se refiere a la separación entre canales, mientras que los bits/símbolo están relacionados con la distancia euclidiana entre los puntos de la constelación. Es decir, a medida que aumenta el número de bits por símbolo, la distancia entre los puntos de la constelación disminuye, lo que incrementa la probabilidad de errores en la transmisión de los datos. Por tal motivo, en formatos como 64QAM, el valor de OSNR es más elevado.

Tabla 1: Valor de OSNR para diferentes tasas y formatos de modulación

<u>Tasa</u>	<u>Modulación</u>	<u>Bits/Símbolo</u>	<u>Rejilla mínima GHz</u>	<u>OSNR mínimo dB</u>
100G	BPSK	1	75,0	10,2
100G	QPSK	2	37,5	10,2
200G	QPSK	2	75,0	13,4
200G	32QAM	5	30,0	19,3
300G	8QAM	3	75,0	17,8
300G	64QAM	6	37,5	25
400G	16QAM	4	75,0	21,2
400G	64QAM	6	50,0	26,2

Nota: Información extraída de manuales de Padtec

2) Tasa de error de bit (BER)

La tasa de error de bit, mejor conocida como BER, es un parámetro que mide la calidad de la señal recibida en los extremos del enlace ya que proporciona información acerca del número de errores ocurridos durante la transmisión. Este parámetro sirve para monitorear el estado de la red completa en las interfaces de transporte óptico al momento de convertir la señal de óptica a eléctrica. La BER se define como la relación entre el número de bits erróneos recibidos y el total de bits transmitidos durante un período de tiempo.

$$BER = \frac{\text{Número de bits erróneos}}{\text{Total de bits transmitidos}} \quad (4)$$

Existe una estrecha relación entre BER y OSNR. Un valor alto de OSNR se traduce en menor números de errores en la comunicación, lo cual, corresponde a una BER baja. De igual forma, un valor bajo de OSNR implica un aumento considerable en el número de errores que puede ser causado por un nivel alto de ruido, mayor atenuación en el enlace, interferencias, entre otros. [15]

Con el objetivo de minimizar el impacto de los errores en la transmisión, se emplea la corrección de errores hacia adelante (FEC), que añade bits adicionales a los datos. El FEC permite que los errores sean detectados y corregidos en el receptor sin necesidad que la información sea retransmitida. En sistemas ópticos, es común analizar la BER antes de aplicar la técnica FEC (BER pre-FEC) para evaluar la efectividad de la corrección de errores. Este análisis ayuda a determinar cuántos errores se producen durante la transmisión sin la intervención del FEC, lo cual, proporciona una referencia sobre el rendimiento del sistema y la capacidad del FEC para corregir los errores en los datos.

3) *Impacto de los efectos no lineales en el OSNR*

Los efectos no lineales como la auto modulación de fase (SPM), modulación de fase cruzada (XPM) y mezcla de cuatro ondas (FWM) impactan significativamente la calidad de la señal en la comunicación debido a que generan ruido, interferencia entre canales y dificultad en la demodulación de la señal. La aparición de efectos no lineales puede resultar en una disminución del desempeño del sistema y de la capacidad máxima que se puede alcanzar.

Estos efectos son más pronunciados en sistemas donde se emplea alta potencia y longitudes de onda cercana, como en sistemas WDM. Como se mencionó anteriormente, en estos sistemas se utilizan amplificadores EDFA, y la alta potencia puede provocar saturación, lo que afecta negativamente la OSNR.

4) *Relación señal a ruido óptica generalizada (GOSNR)*

La GOSNR es un parámetro utilizado para evaluar la calidad de la señal en los sistemas ópticos. A diferencia del OSNR tradicional, la GOSNR incluye tanto el ruido lineal como el ruido no lineal generado por los efectos no lineales de la fibra óptica. El ruido lineal es causado principalmente por la emisión espontánea amplificada en los amplificadores EDFA, mientras que el ruido no lineal surge de la interacción entre la señal óptica y el aumento de potencia.

El parámetro ofrece una visión más completa de la degradación total de la señal, al tener en cuenta todas las fuentes de ruido que influyen en la transmisión a través del enlace, permitiendo una mejor evaluación del rendimiento del sistema. Es importante señalar que la GOSNR no incluye ruidos de implementación ni la distorsión introducida por los transponders, teniendo en cuenta que pueden afectar la calidad de la señal bajo condiciones reales. [16, p.10]

La ecuación 5 permite calcular la métrica GOSNR, donde $OSNR_{ASE}$ corresponde a la relación señal a ruido generada por los EDFA, la cual puede ser calculada utilizando las ecuaciones 1 y 2. El término $OSNR_{NL}$ hace alusión a la relación señal a ruido causada por las no linealidades, y $OSNR_{GAWBS}$ representa la relación señal a ruido debido a los modos acústicos generados por la dispersión acústica guiada en la fibra (GAWBS).

$$\frac{1}{GOSNR} = \frac{1}{OSNR_{ASE}} + \frac{1}{OSNR_{NL}} + \frac{1}{OSNR_{GAWBS}} \quad (5)$$

La dispersión guiada de ondas acústico-óptica es un fenómeno crítico que ocurre en la fibra, donde los modos acústicos interactúan con la luz transmitida. Este fenómeno puede llegar

a tener un impacto significativo en el rendimiento del sistema ya que introduce una penalidad en la calidad de las señales transmitidas. GAWBS se caracteriza por ser un efecto de banda estrecha, esto implica que la dispersión de la luz se produce dentro del propio ancho de banda del canal. Como resultado, normalmente no se incorpora directamente en el cálculo convencional de OSNR. En cambio, su contribución al ruido se estima linealmente, tomando en cuenta la distancia del enlace. [17 p.4]

Las no linealidades en los sistemas ópticos pueden ser estimadas empleando diversos modelos teóricos, entre los cuales se destacan el método perturbativo, modelo de ruido gaussiano (GN), modelo de ruido gaussiano incoherente (IGN), entre otros [18]. En particular, el modelo GN hace una aproximación clave respecto a las no linealidades al suponer que el ruido es de tipo gaussiano y que su comportamiento puede ser descrito como una perturbación a la señal de interés, siempre y cuando, tengan un bajo impacto en la señal. Además, el modelo GN asume condiciones estacionarias en el enlace, es decir, las características como ganancia, potencia y ruido permanecen constante durante todo el trayecto. Pese a que estas aproximaciones facilitan el análisis del sistema, puede no considerar todos los efectos no lineales complejos presentes en el entorno debido a altos niveles de potencia.

Es posible trabajar con la métrica SNR_{ASE} , ecuación 6, y GSNR, ecuación 7, que representan una versión del GOSNR y $OSNR_{ASE}$ independientes de la velocidad de baudios, respectivamente. Es decir, no dependen del espaciamiento entre canales ni de la velocidad de símbolos. [17, p.3]

$$SNR_{ASE} = \frac{B_o}{\Delta f} OSNR_{ASE} \quad (6)$$

$$GSNR = \frac{B_o}{\chi \Delta f} GOSNR \quad (7)$$

Para las ecuaciones 5 y 6, B_o es igual al ancho de banda de ruido óptico en GHz empleado para definir el $OSNR_{ASE}$, Δf representa la rejilla en GHz y χ indica la ocupación del ancho de banda.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, la métrica GSNR se calcula utilizando la ecuación 8, que se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{1}{GSNR} = \frac{1}{SNR_{ASE}} + \frac{1}{SNR_{NL}} + \frac{1}{SNR_{GAWBS}} \quad (8)$$

$$SNR_{GAWBS} = \frac{1}{\Gamma_{GAWBS} * L} \quad (9)$$

La relación señal a ruido debido al GAWBS se calcula empleando la ecuación 8 donde, Γ_{GAWBS} es una constante que depende del área efectiva de la fibra, por ejemplo, es igual a $-30.2 \frac{dB}{Mm}$ para un área efectiva de $150 \mu m^2$ y L es la distancia de transmisión.

5) Relación señal a ruido efectiva (ESNR)

La relación señal a ruido efectiva es una métrica de la calidad de la señal que incorpora el ruido total que impacta la señal durante su transmisión. Esta métrica es ampliamente utilizada en sistemas con múltiples fuentes de ruido simultáneas, proporcionando una evaluación más realista del rendimiento del sistema en general.

A diferencia de la relación señal a ruido convencional, la ESNR incluye las contribuciones del ruido lineal, no lineal y ASE. El ruido lineal surge de las características intrínsecas de la fibra, el ruido no lineal se origina de los efectos no lineales y el ruido ASE aparece cuando el sistema hace uso de amplificadores EDFA.

Esta métrica puede ser calculada de acuerdo con la ecuación 10, donde σ_{ASE}^2 y σ_{NLI}^2 representan la varianza del ruido ASE y del ruido por NL, respectivamente. Para σ_{NLI}^2 se asume que la potencia por canal y el formato de modulación es el mismo para todos los canales. [19]

$$SNR_{eff} = \frac{P}{\sigma_{ASE}^2 + \sigma_{NLI}^2} \quad (10)$$

En la figura 13, se presenta un gráfico del ESNR en función de la potencia media por canal. La curva negra muestra el ESNR considerando todos los efectos de interferencia intersimbólica (ISI). En la curva punteada, se mitiga la principal contribución de las no linealidades, representadas como ruido de fase y rotación de polarización (PPRN). Las curvas siguientes eliminan gradualmente el impacto de otros términos de la matriz \mathbf{R}_n descrita en [19 p.9], utilizada para cuantificar los efectos de las no linealidades en el sistema.

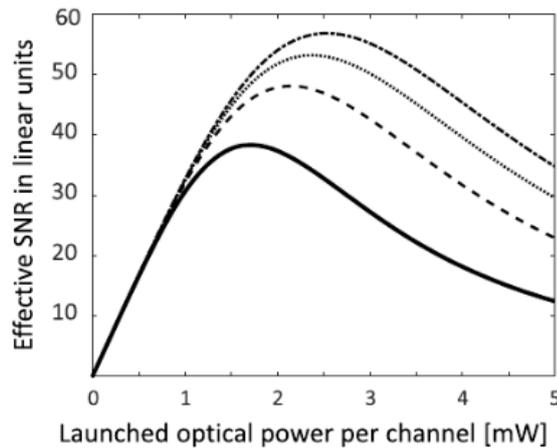


Figura 13: SNR efectivo en función de la potencia por canal tomado de [19]

6) Factor Q

El factor Q corresponde a un parámetro de calidad que mide la relación señal a ruido en unidades de voltaje o corriente. Como se muestra en la ecuación 10, se calcula mediante el valor medio de los niveles lógicos μ_0 y μ_1 , y las desviaciones estándar σ_0 y σ_1 en torno a la distribución del ruido gaussiano de los niveles lógicos antes mencionados. Gracias a este parámetro se logra llevar a cabo una evaluación del desempeño del sistema debido a que representa la relación entre la señal útil y el ruido presente debido a las degradaciones ocurridas durante el trayecto recorrido. [10, 20 p.57]

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad (11)$$

La BER y el Factor Q están estrechamente relacionados en los sistemas ópticos. Un valor elevado de Factor Q indica una mayor calidad de la señal, reduciendo la probabilidad de errores en la recepción y, en consecuencia, resulta un BER bajo. [20 p. 57]. En sistemas donde la señal sigue una distribución gaussiana, la BER se puede aproximar usando la siguiente expresión.

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{Q}{2} \right) \quad (12)$$

En la ecuación 12, erfc es la función de error complementaria y Q representa el valor del Factor Q .

H. VPItransmissionMaker Optical Systems

Es una herramienta de simulación especializada en el análisis de la transmisión de señales en redes basadas en fibra óptica. El software hace parte de la plataforma VPIphotonics Design Suite, la cual, es ampliamente usada en el ámbito de las telecomunicaciones ya que permite diseñar, modelar y simular sistemas ópticos y fotónicos complejos para llevar a cabo proyectos de investigación e, inclusive, la implementación práctica de estos. [21]

A través de esta herramienta se tiene la facilidad de evaluar y estudiar el comportamiento de los distintos componentes y tecnologías empleadas en las comunicaciones ópticas tales como transmisores y receptores coherentes y no coherentes, multiplexores, DCM, amplificadores ópticos, moduladores, WSS y otros. También, permite modelar las penalidades causadas por efectos lineales y no lineales que surgen durante la transmisión de señales.

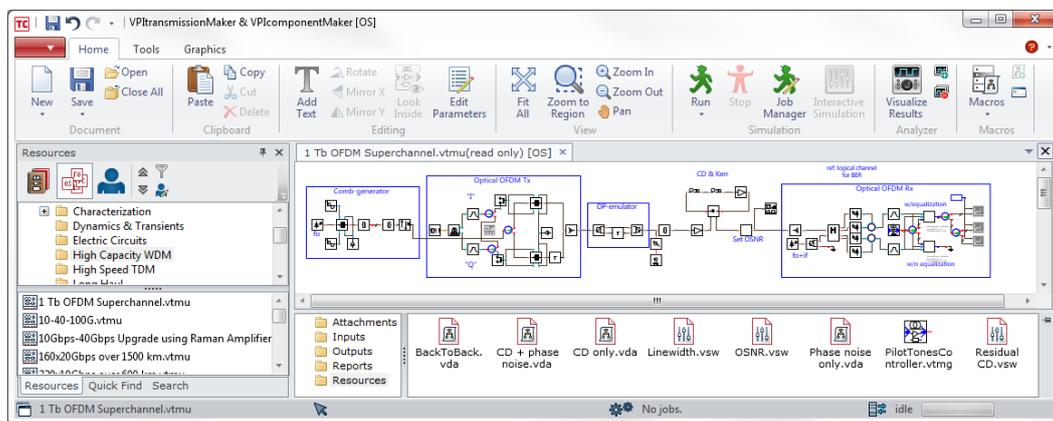


Figura 14: Interfaz del simulador VPI tomado de [18]

El software posee un modelo de fibra óptica universal capaz de simular todos los efectos de propagación de una señal de forma individual o simultánea. También tiene la posibilidad de emplear una fibra para modelar señales y láseres de bombeo Raman en sentido de propagación o en contra sentido.

Las señales ópticas se modelan matemáticamente mediante la ecuación de Schrödinger de acuerdo con el campo eléctrico. En la ecuación 13, \mathbf{D} hace alusión a la dispersión cromática, \mathbf{N} representa los efectos no lineales y α actúa como la atenuación. En la expresión de la dispersión cromática, ecuación 14, β_1 está asociado a la velocidad de grupo de la señal y β_2 indica la dispersión de la velocidad de grupo. Por su parte, en la ecuación 15, γ es el coeficiente no lineal de la fibra y E corresponde al campo eléctrico.

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial z} = \left(\mathbf{D} + \mathbf{N} - \frac{\alpha}{2} \right) \mathbf{E} \quad (13)$$

$$\mathbf{D} = \beta_1 \frac{\partial}{\partial t} - j\beta_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \quad (14)$$

$$\mathbf{N} = -j \frac{8}{9} \gamma |\mathbf{E}|^2 \quad (15)$$

Dado a que no existe una solución analítica para las ecuaciones anteriores, el software VPI emplea el método numérico conocido como Split-Step Fourier que consiste en dividir el enlace en pequeños segmentos de longitud h aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT) para encontrar el parámetro lineal y la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT) para la parte no lineal, tal como se describe en la ecuación 16.

$$E(z + h, t) = e^{hD} e^{hN} E(z, t) \quad (16)$$

1. Escenario de simulación

El escenario de simulación consiste en utilizar de 2 a 7 transmisores ópticos, seguidos de un filtro que define el ancho de banda. A continuación, la señal pasa por un multiplexor, un EDFA y un Raman, estos elementos se encuentran a la derecha del transmisor, como se muestra en la figura 15. En el lado del receptor, se encuentra un amplificador híbrido HOA. Posteriormente, la señal pasa a través de un filtro que permite separar la longitud de onda y llega a un receptor óptico. Finalmente, se ajustan distintos valores de OSNR para estudiar el comportamiento de la BER y del Factor Q, como se observa en la figura 16. De este modo, la señal será analizada mediante distintos gráficos, los cuales se presentan en la sección de anexos.

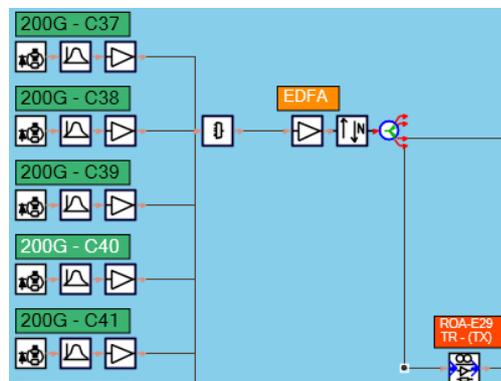


Figura 15: Ilustración de la transmisión en el escenario de simulación

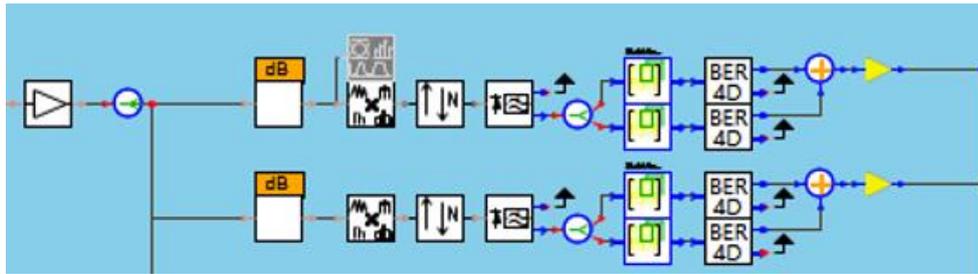


Figura 16: Ilustración del ajuste de OSNR en el escenario de simulación

VI. Metodología

A. Etapa 1

Recopilar información acerca del estado de la red SLTE implementada actualmente en el cable submarino Venezuelan Festoon.

- Extraer la topología y elementos actuales de los enlaces
- Determinar parámetros como el número de canales implementados, potencia de transmisión, coeficiente de atenuación, dispersión cromática y otros.

B. Etapa 2

Elaborar un reporte de cálculo de la capacidad total bajo condiciones actuales del cable teniendo en cuenta el OSNR, Factor Q y estado de calibración de la red.

C. Etapa 3

Estimar la capacidad total futura que se puede alcanzar con el cable mediante la identificación de puntos de mejora de la red.

- Identificar qué mejoras se pueden llevar a cabo para aumentar la capacidad total
- Realizar un nuevo cálculo de la capacidad alcanzable por el sistema

D. Etapa 4

Calcular la inversión total que se necesitaría para lograr la capacidad máxima del cable.

E. Etapa 5

Simular en el software VPI el comportamiento de los efectos no lineales en el cable Venezuelan Festoon.

VII. Resultados y análisis

A. Información actual de la red Venezuelan Festoon

A continuación, se presenta la topología actual de la red en donde se describe los componentes principales tales como los tipos de nodos que la conforman, las distancias de los enlaces, canales implementados y parámetros de calidad.

1) Topología actual

La topología del Venezuelan Festoon, figura 17, es tomada del mapa del cableado submarino. Es importante señalar que el enlace San Rafael del Moján – Cabimas, cercano al lago de Maracaibo, no está operativo en la actualidad. En la figura 18, se presenta la estructura actual y operativa de la red, en la que se indican los nombres y tipos de nodos que la componen: nodos FOADM y ROADM.



Figura 17: Cable Venezuelan Festoon, actualizado el 9 de octubre tomado de [13]

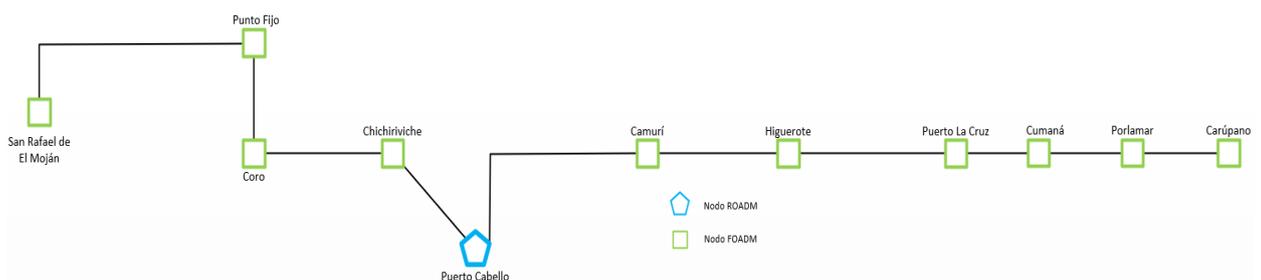


Figura 18: Topología actual de la red submarina

2) Distancia de los enlaces

La tabla 2 muestra los enlaces que componen la red del Festoon, junto con sus respectivas distancias. Esta información también está disponible de forma gráfica en la figura 19.

Tabla 2: Distancia en kilómetros de los enlaces que conforman el Festoon

Enlace	Distancia del enlace (km)
San Rafael del Moján – Punto Fijo	223
Punto Fijo – Coro	95
Coro – Chichiriviche	220
Chichiriviche – Puerto Cabello	60
Puerto Cabello - Camurí	150
Camurí – Higuero	125
Higuero – Puerto La Cruz	160
Puerto La Cruz – Cumaná	92
Cumaná – Porlamar	95
Porlamar - Carúpano	84,5
Total	1304,5

Nota: Información extraída de la topología de NET

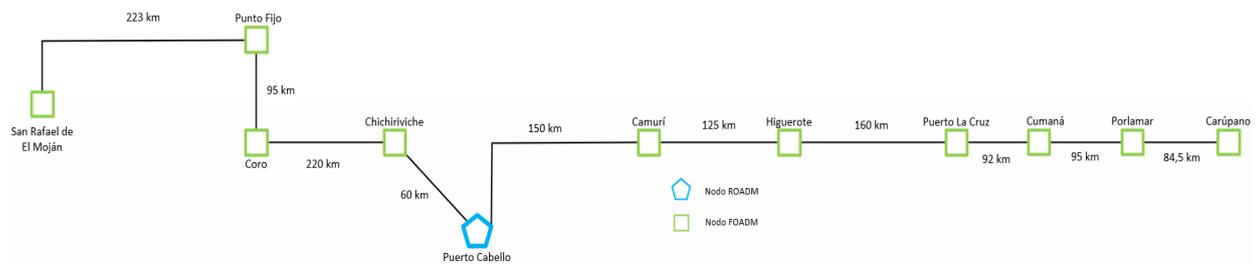


Figura 19: Topología y distancia de cada enlace.

3) Información de los amplificadores

La tabla 3 proporciona información acerca de la potencia de transmisión y recepción de los amplificadores en cada nodo. Con estos datos se determina la atenuación aproximada de ambos sentidos del enlace siguiendo la ecuación 17. Se observa que, en algunos enlaces se tiene una atenuación mayor en uno de los sentidos de comunicación debido a las degradaciones que ocurren en este medio de transmisión. En la columna atenuación se presentan dos valores distintos el primer valor, ubicado en la primera columna de izquierda a derecha, corresponde a la atenuación medida desde la transmisión del nodo 1 hasta la recepción del nodo 2. Por otro lado, el segundo valor en la siguiente columna representa la atenuación en la dirección opuesta, es decir, desde la transmisión del nodo 2 hasta la recepción del nodo 1.

$$\alpha = P_{out} - P_{in} \quad (17)$$

Tabla 3: Potencia de transmisión y recepción de las amplificadoras y atenuación total de cada enlace

<u>Nodo 1</u>	<u>TX dBm</u>	<u>RX dBm</u>	<u>Nodo 2</u>	<u>TX dBm</u>	<u>RX dBm</u>	<u>Atenuación total</u>	
San Rafael del Moján	9,55	-21,29	Punto Fijo	8,7	-12,75	22,3	29,99
Punto Fijo	6,89	-14,79	Coro	5,75	-11,39	18,28	20,51
Coro	9,55	-14,63	Chichiriviche	8,73	-10,8	20,35	23,36
Chichiriviche	9,98	-8,88	Puerto Cabello	6,63	-6	15,98	15,51
Puerto Cabello	8,04	-15,84	Camurí	9,58	-9,85	17,89	25,42
Camurí	10,29	-4,95	Higuerote	8,8	-8,45	18,74	13,75
Higuerote	6,95	-17,07	Puerto La Cruz	10,13	-21,35	28,3	27,2
Puerto La Cruz	2,72	-10,58	Cumaná	2,72	-13,94	16,66	13,3
Cumaná	4,98	-16,01	Porlamar	4,73	-5,63	10,61	20,74
Porlamar	2,91	-5,93	Carúpano	2,84	-6,66	9,57	8,77

Nota: Información extraída de las amplificadoras activas de la red de NET

El tipo de amplificadora empleada en cada nodo de la red está representado gráficamente en la figura 20. En este tipo de red no se tiene nodos de amplificación, por lo cual, el proceso de amplificación se lleva a cabo únicamente en los extremos que componen un enlace, los cuales, corresponden a nodos FOADM y ROAD. Tomando como ejemplo el enlace Coro – Chichiriviche, el círculo amarillo indica que se usa amplificación híbrida en ambos nodos y los puntos azules indican que luego del HOA, en cada nodo se utiliza amplificación Raman en transmisión. Cabe aclarar que el enlace y, cada uno de los enlaces que componen al Festoon, son bidireccional y, por tanto, en ambos sentidos la señal pasa por los mismos elementos pero en diferentes etapas de estos.

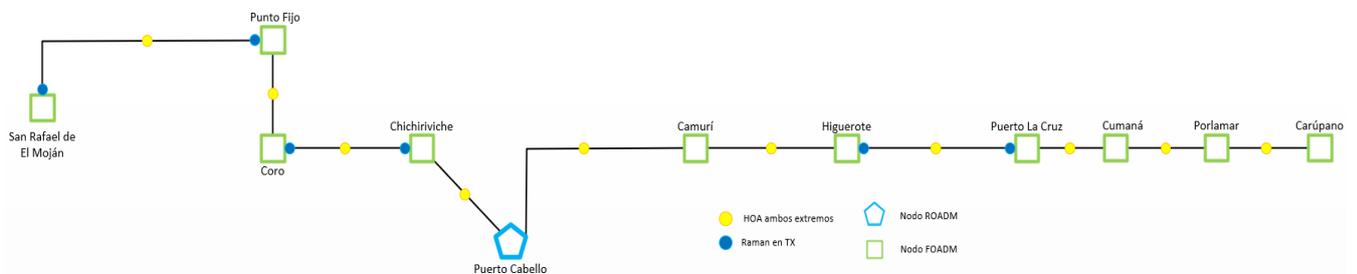


Figura 20: Tipo de amplificación usado en los enlaces

En los enlaces mayores a 130 km, aproximadamente, es muy usual encontrar amplificadoras Raman para cubrir en su totalidad la distancia. Como se mencionó anteriormente, el Raman puede ser situado tanto en transmisión como en recepción, pero se debe tener en cuenta que ofrece mayor ganancia en recepción debido a que ayuda a superar la degradación en el tramo de fibra antes de hacer pasar la señal por un EDFA. En algunos casos, como se percibe en el Festoon, no es suficiente con tener Raman en recepción y, por ende, se agrega este elemento en transmisión para mejorar la señal antes de que entre a la fibra, logrando reducir el impacto de las pérdidas en el medio.

4) Información de las transponders

Las transponders son placas ampliamente utilizadas en las redes DWDM, las cuales, permiten asignar una tasa y un formato de modulación determinado, de acuerdo con el OSNR y Factor Q alcanzados en las respectivas interfaces de línea de estos elementos. La tabla 4 presenta información de los parámetros mencionados anteriormente por cada transponder que conforma la red, tal como se visualizan en la gestión. Se destaca que estos valores, en la mayoría de los casos, se ven afectados por la atenuación en la fibra, así como por efectos no lineales.

En la figura 21, se visualiza la topología de la red junto con las tasas operativas por enlace. En esta sección de la red se hace uso de las siguientes transponders: T1, T2 y T3. La diferencia entre los tres tipos de transponder es la tasa máxima que pueden soportar ya sea 200G, 400G, etc.

Tabla 4: OSNR, Factor Q y tasa de modulación por enlace

<u>Enlace</u>	<u>OSNR dB</u>	<u>Factor Q dBQ</u>	<u>Tasa</u>	<u>Formato de modulación</u>
San Rafael del Moján - Punto Fijo	17,8	7,6	200G	DP-QPSK
Punto Fijo – Coro	27,3	8,4	400G	DP-16QAM
Coro – Punto Fijo	28,3	8,8	400G	DP-16QAM
Coro - Chichiriviche	17,6	10,9	100G	QPSK Denali
Chichiriviche - Coro	19,3	12,3	100G	QPSK Denali
Coro – Puerto Cabello	19,1	8	200G	DP-QPSK
Puerto Cabello – Coro	18,8	7,8	200G	DP-QPSK
Chichiriviche – Puerto Cabello	29,1	15,8	100G	QPSK Denali
Puerto Cabello – Chichiriviche	30,7	16	100G	QPSK Denali
Puerto Cabello – Camurí	30,2	8,3	400G	DP-16QAM
Camurí – Puerto Cabello	20,1	9,1	400G	DP-16QAM
Camurí – Higuero	32,2	9,3	400G	DP-16QAM
Higuero – Camurí	32,4	9,4	400G	DP-16QAM
Camurí – Puerto La Cruz	25,3	8,9	300G	DP 8QAM
Puerto La Cruz – Camurí	21,3	7,5	300G	DP 8QAM
Puerto La Cruz – Cumaná	28,1	11	200G	8QAM Denali
Cumaná - Puerto La Cruz	26	10,6	200G	8QAM Denali
Cumaná – Porlamar	25,7	10,5	200G	8QAM Denali
Porlamar - Carúpano	26,3	10,9	200G	8QAM Denali
Carúpano – Porlamar	25,7	10,4	200G	8QAM Denali

Nota: Información tomada de las transponder de la red de NET

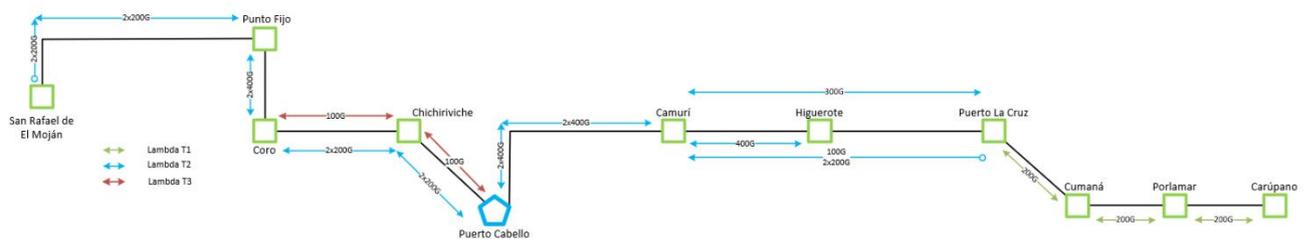


Figura 21: Topología del Festoon con la modulación por enlace

Tal como se mencionó en la sección E del marco teórico, para modular una señal a determinada tasa con un cierto tipo de formato de modulación, se debe garantizar un mínimo valor de OSNR para que haya adyacencia entre los extremos del enlace y, también, para el ruido no tenga una alta afectación sobre los servicios a implementar en el tramo.

B. Capacidad total bajo condiciones actuales de la red

Para calcular la capacidad total por enlace que es alcanzada bajo las condiciones actuales de la red, es necesario emplear la información de la tabla 3 columna TX dBm ya que con este dato se calcula la potencia por canal de acuerdo con la ecuación 17. P_{Tx} corresponde a la potencia de transmisión por canal que está actualmente implementada y que debe ser optimizada para minimizar el impacto de los efectos no lineales y $\#Canales\ actuales$, como su nombre lo indica, representa los canales que pasan por el tramo. La columna 2 de la tabla 5, indica la potencia por canal que se transmite en el nodo 1 mientras que la columna 4 hace referencia a la misma potencia en el nodo 2. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que los multiplexores ópticos usados en la red tienen un máximo de 40 canales.

$$P_{1ch} = P_{Tx}(dBm) - 10 \log_{10}(\#Canales\ actuales) \quad (17)$$

Tabla 5: Potencia por canal y número de canales usados actualmente según enlace.

<u>Nodo 1</u>	<u>P_{1ch} dBm</u>	<u>Nodo 2</u>	<u>P_{1ch} dBm</u>	<u>Canales implementados</u>	<u>Canales disponibles</u>
San Rafael	6,54	Punto Fijo	5,69	2	38
Punto Fijo	3,88	Coro	2,71	2	38
Coro	4,78	Chichiriviche	3,96	3	37
Chichiriviche	6,97	Puerto Cabello	3,62	2	38
Puerto Cabello	5,03	Camurí	6,57	2	38
Camurí	3,30	Higuerote	1,81	5	35
Higuerote	0,93	Puerto La Cruz	4,11	4	36
Puerto La Cruz	2,72	Cumaná	2,72	1	39
Cumaná	4,98	Porlamar	4,73	1	39
Porlamar	2,91	Carúpano	2,84	1	39

Nota: Información extraída de la red de NET

La información contenida en la tabla anterior ayuda a determinar el máximo número de canales que pueden ser implementados en la red bajo condiciones actuales. Dicho valor se calcula mediante la ecuación 18. Los resultados del máximo número de canales para cada nodo se consolidan en la tabla 6.

$$\# \text{ máximo de canales} = 10^{\frac{P_{Tx}(dBm) - P_{1ch}}{10}} \quad (18)$$

Tabla 6: Número máximo de canales permitidos

Nodo 1	Máximo número de canales	Nodo 2	Máximo número de canales
San Rafael	28	Punto Fijo	34
Punto Fijo	40	Coro	40
Coro	40	Chichiriviche	40
Chichiriviche	25	Puerto Cabello	40
Puerto Cabello	40	Camurí	28
Camurí	40	Higuerote	40
Higuerote	40	Puerto La Cruz	40
Puerto La Cruz	40	Cumaná	40
Cumaná	40	Porlamar	40
Porlamar	40	Carúpano	40

Nota: Máximo número de canales a permitidos teniendo en cuenta la información de las amplificadoras.

Al realizar un comparativo entre la capacidad de los multiplexores implementados (40 canales) con lo permitido por el comportamiento del sistema, tabla 6 columnas 2 y 4, se encuentra una situación particular dado la calibración de los enlaces. Cuando no se calibra de manera adecuada la potencia de transmisión de las amplificadoras, se limita el crecimiento de la red a nivel de canales y servicios por los efectos no lineales que surgen al aumentar la potencia. Tomando como ejemplo uno de los valores registrados en la tabla 6, en el enlace Chichiriviche \leftrightarrow Puerto Cabello se observa una gran diferencia en el número de canales máximos permitidos ya que en Chichiriviche solo se permite hasta 25 canales mientras que en Puerto Cabello se permiten los 40 canales, por ende, 25 es el número máximo de canales permitidos en este tramo para garantizar un correcto funcionamiento. También, se determina que en la mayoría de los tramos es posible implementar el máximo número de canales ofrecidos por los multiplexores ópticos existentes indicando una calibración óptima dado que la potencia de transmisión por canal es menor a 5 dBm, ver tabla 5. Cabe mencionar que, sería posible alcanzar en todos los enlaces la capacidad de canales totales de los multiplexores siempre que se garantice baja presencia de NL, en caso contrario, no sería segura que el enlace pueda soportar todos los canales.

C. Puntos de mejora del Festoon

A partir de la información proporcionada en las tablas 2 a 6, se encuentra que hay varias mejoras que se pueden realizar en el sistema submarino analizado, entre ellas se encuentra:

- Realizar calibraciones en la capa óptica ajustando adecuadamente la potencia de transmisión en los amplificadores, dentro de los límites permitidos por la red, para mitigar escenarios de saturación sin llegar a comprometer los servicios activos en los diferentes enlaces.

Según la tabla 5, los nodos que requieren un ajuste de potencia son: San Rafael del Moján, Punto Fijo, Puerto Cabello y Camurí. Esto se debe a que los amplificadores en estos nodos están saliendo con una potencia por canal superior a $5dBm$, a pesar de que solo están ocupando 2 canales de los multiplexores en cada nodo. En estos casos, la solución radica en disminuir la potencia de transmisión a un valor inferior a $5dBm$, sin embargo, esto impactaría directamente el OSNR ya que limitaría la tasa máxima que el enlace puede soportar pese a que reduzca los efectos no lineales y sea posible aumentar el número de canales que pueden implementarse.

- Los enlaces Coro-Chichiriviche y Chichiriviche-Puerto Cabello, actualmente configurados a una tasa de 100G, pueden ser mejorados reemplazando los transponders por unos más robustos frente a la dispersión cromática y que incorporen técnicas avanzadas de procesamiento digital de señales (DSP) dado a que cuentan con buen margen a nivel de OSNR y Factor Q.
- Incrementar el espaciamiento entre canales para reducir el impacto de FWM y XPM. Sin embargo, esta medida limitaría la capacidad de expansión de la red en cuanto al número total de canales disponibles. Por ejemplo, para un multiplexor de 40 canales, al dejar un canal de guarda entre canales consecutivos, el número de canales totales se reduce a 20, disminuyendo considerablemente el margen de expansión.
- Ajustar la tasa de baudios de la señal para que trabaje en un ancho espectral mayor permitiendo la implementación de mayores tasas. Este ajuste puede ser configurado en aquellos enlaces que presentan altas potencias de transmisión para mejorar el desempeño de los canales de tal manera que la capacidad se adapte a las condiciones del enlace.

D. Análisis para la nueva capacidad alcanzada

El comportamiento del OSNR, Factor Q y BER son considerados para determinar la viabilidad de mejorar la capacidad de los distintos canales en las tarjetas transponder, a medida que cambia la potencia por canal en las amplificadoras. El análisis presentado a continuación, se basa en la información contenida en las tablas 4, 5 y 6. Se debe tener en cuenta que, dentro de la operación se considera que el canal tiene correspondencia y “sube” adecuadamente sin errores cuando el Factor Q tiene un valor por encima de 7dBQ.

Para todos los enlaces exceptuando San Rafael del Moján – Punto Fijo y Chichiriviche - Puerto Cabello, es posible incrementar fácilmente la tasa de modulación debido a que se cuenta con un gran margen operativo respecto a los parámetros de desempeño.

- Enlace Punto Fijo – Coro: Se recomienda cambiar la transponder existente por una que permita mejores formatos de modulación ya que, bajo las premisas actuales, se tendría la posibilidad de modular a 500G teniendo en cuenta que está en 400G.
- Enlace Coro – Chichiriviche: Se recomienda instalar una transponder más actualizada con la cual se pueda lograr un mejor desempeño y margen en relación a la dispersión cromática y procesamiento de señales. De esta manera, se pasaría de lambdas de 100G a 200G e incluso 300G.
- Enlace Camurí – Higuero: También se puede implementar una transponder de mayor calidad de tal manera que se alcance una capacidad de máximo 550G.
- Enlace Camurí – Puerto La Cruz: Se puede subir las lambdas a 350G e inclusive a 400G saliendo con un poco más de potencia de las amplificadoras en Higuero, en donde se cuenta con un rango de operación aceptable para modificar la potencia por canal sin impactar el desempeño de los canales existentes.
- Enlaces Puerto La Cruz – Cumaná, Cumaná – Porlamar, Porlamar - Carúpano: Dado al margen operativo que tienen, solo sería necesario cambiar las transponder de los nodos en cada enlace para subir el canal a 400G.

La tabla 5 muestra que la potencia de transmisión de las amplificadoras supera los 5dBm en los enlaces San Rafael del Moján – Punto Fijo, Camurí (TX) – Puerto Cabello (RX) y Chichiriviche (TX) – Puerto Cabello (RX), lo que introduce limitaciones en el rendimiento y dificulta alcanzar tasas de transmisión superiores. En el enlace San Rafael del Moján – Punto Fijo, la principal restricción radica en el uso de fibra G.653 que es altamente susceptible a efectos no lineales como FWM dado a su baja dispersión en la banda C. Según la tabla 4, este enlace tiene dos canales activos, cada uno modulado a 200G con un margen limitado, impidiendo incrementar la tasa de transmisión bajo el estado actual del enlace.

Para el enlace Camurí (TX) – Puerto Cabello (RX), existe la posibilidad de aumentar la capacidad de 400G a 500G mediante la actualización del transponder a uno más “avanzado”, junto con ajustes para reducir la saturación en la transmisión hacia Puerto Cabello. Finalmente, en el enlace Chichiriviche (TX) – Puerto Cabello (RX), aunque también se observa una saturación en la transmisión hacia Puerto Cabello, los parámetros de desempeño tales como OSNR y Factor Q son óptimos, permitiendo pasar de una tasa de 100G a 400G, o incluso alcanzar capacidades superiores mediante la migración de los canales existentes a un transponder de mayor capacidad. No obstante, se debe tener en cuenta que en ambos enlaces el crecimiento a nivel de canales está siendo limitado por los efectos no lineales que estos presentan.

La decisión de reemplazar un transponder por uno más actualizado, que ofrezca mayor capacidad, se debe principalmente a que los modelos actualmente en uso no permiten aumentar la tasa de los canales. Por tal razón, la única alternativa viable es realizar un cambio de placa porque a nivel de parámetros de desempeño se tiene buen margen.

E. Inversión necesaria para ampliar la capacidad en la red

Según las propuestas mencionadas en el ítem D para incrementar la capacidad de los canales, la tabla 7 proporciona información sobre la inversión total necesaria para implementar las mejoras mencionadas en la red.

Tabla 7: Presupuesto necesario para ampliar la inversión de la red

Producto	PRECIO UNITARIO (USD)	Punto Fijo	Coro	Chichiriviche	Camurí	Higuerote	Pto. La Cruz	Cumaná	Porlamar	Carúpano	Puerto Cabello	TOTAL	PRECIO TOTAL (USD)
												360.000,00	
Muxponder Standalone 100G-600G	35.000	1	1		2	1					1	6	210.000,00
Muxponder Dual 100G+	15.000		1	2			1	2	2	1	1	10	150.000,00

Nota: Precios extraídos de equipos Padtec

F. Simulación de efectos no lineales en un enlace de dos canales operativos

Con el objetivo de analizar el comportamiento de los efectos no lineales en el enlace más crítico de la red de NET, Punto Fijo – San Rafael de El Moján, se realizó una simulación del tramo usando el software VPI. Los parámetros empleados fueron:

- Potencia por canal: Se tomó como referencia una potencia back-to-back (B2B) de -15 dBm en donde los efectos no lineales no impactarán la señal transmitida. Así mismo, se realizaron mediciones desde 0 dBm hasta 10 dBm , con incrementos de 2 dBm .
- Cantidad de canales: El enlace está conformado por dos canales, C21 y C22. Para realizar las mediciones se usó como referencia el canal 22.
- Tipo de fibra óptica: Se utiliza fibra G.653 pese a que su nula dispersión cromática y su pequeña área efectiva aumentan la aparición de efectos no lineales.
- Formato de modulación: 200G DP-QPSK, es un tipo de modulación que aprovecha las dos polarizaciones de la luz para transmitir más información sin ocupar más ancho de banda del netamente necesario. Es más robusto frente a la dispersión y a efectos no lineales puesto que emplea menores niveles de potencia por canal.
- Distancia total del enlace: 223 km
- Área efectiva: $50 * 10^{-12} \text{ m}^2$
- Dispersión cromática: $0 \text{ ps/nm} * \text{km}$
- Pendiente de dispersión: $0.058 * 10^3 \text{ ps/nm}^2 * \text{km}$

Para la simulación, se utilizaron señales muestreadas para analizar los efectos no lineales en el sistema, dado que lo más relevante para evaluar el desempeño, en presencia de estos efectos, es la potencia por canal mas no la información a gran escala sobre las amplificadoras como la figura de ruido y la ganancia.

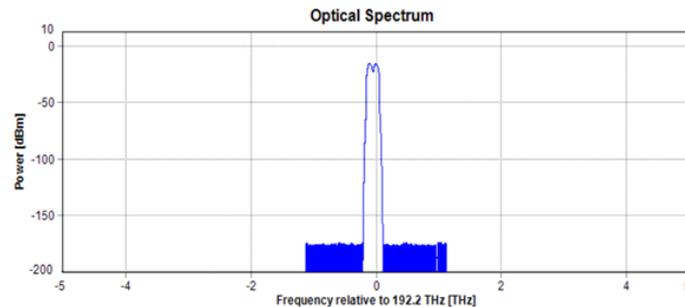


Figura 22: Señal muestreada con dos canales, tomado del VPI

Los resultados demuestran que, aunque el enlace cuenta con un número reducido de canales, los efectos como FWM, SPM y XPM se intensifican a medida que aumenta la potencia por canal. En la figura 21, se presenta el comportamiento de ambos canales bajo una potencia back-to-back (B2B), sin que estos efectos impacten la señal. Por otro lado, en la figura 24, se aprecia cómo las no linealidades distorsionan los canales, hasta el punto de volverlos irreconocibles. Esto ocurre debido a que, bajo condiciones de alta potencia, el rendimiento del enlace y la calidad de la señal disminuyen considerablemente.

El OSNR es un indicativo clave de la calidad de la señal al final del enlace que, además, influye en la elección del tipo de modulación que se puede implementar. Un OSNR elevado permite utilizar formatos de modulación más complejos como QAM, mientras que un OSNR bajo limita las modulaciones a formatos más simples como BPSK o QPSK. En los diagramas de constelación de las figuras 23 y 24, se observa que el OSNR se degrada de forma significativa al trabajar con altas potencias debido a la aparición de efectos no lineales. Este comportamiento confirma la disminución de la calidad de la señal, ya que los puntos de la constelación se dispersan, haciéndose menos distinguibles y aumentando la probabilidad de errores durante la transmisión. Por lo tanto, es evidente que el aumento de potencia no siempre mejora el rendimiento y un OSNR óptimo debe equilibrar factores como potencia y no linealidades para conservar una calidad alta en las señales.

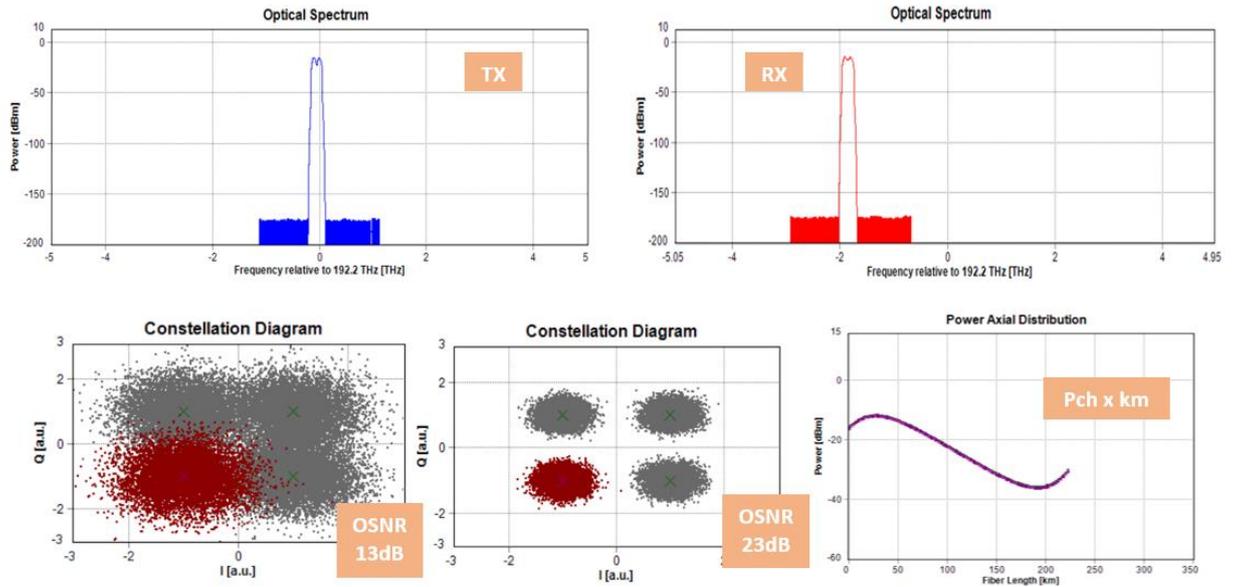


Figura 23: Resultados obtenidos para dos canales a una potencia back-to-back (B2B) de -15dBm

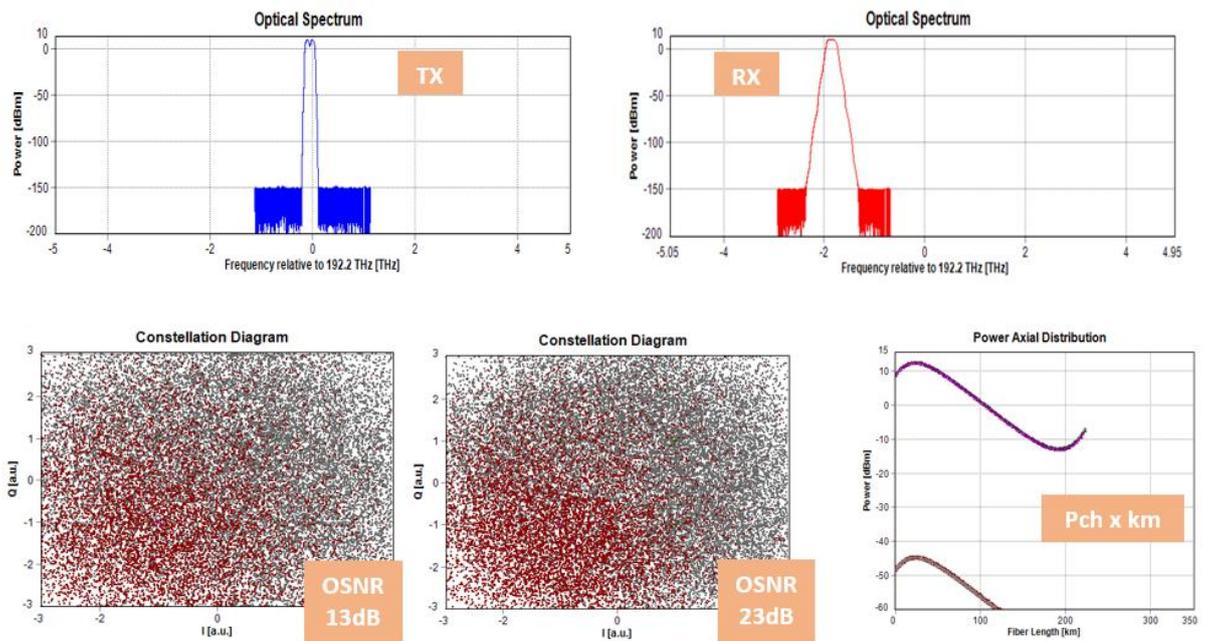


Figura 24: Resultados obtenidos a una P_{ch} de 10 dBm para dos canales

Por otro lado, la relación entre BER y OSNR es fundamental en el análisis del rendimiento de sistemas ópticos, especialmente en redes WDM. Esta relación es inversa, ya que a medida que el OSNR aumenta, el número de errores durante la transmisión disminuye, traduciéndose en valores de BER bajos. Los sistemas de modulación avanzada y altas tasas de transmisión son particularmente sensibles a valores bajos de OSNR, por ende, requieren de una

monitorización constante para garantizar que los niveles de errores se mantengan dentro de rangos aceptables, asegurando así el correcto funcionamiento del sistema.

En la tabla 8, se presentan los resultados relativos a tasa de error de bit (BER) para distintos niveles de potencia. Para una misma potencia de transmisión, se observa que el BER disminuye a medida que el OSNR aumenta, indicando una mejora en la calidad de la señal óptica. No obstante, a medida que la potencia incrementa, los niveles de errores también tienden a aumentar, dado a la aparición de NL. Esta relación destaca la importancia de “controlar” adecuadamente tanto el OSNR como la potencia de transmisión por canal con el fin de optimizar el desempeño del sistema.

Tabla 8: Tasa de error de bit vs OSNR para un enlace de 223km

<u>OSNR</u>	<u>B2B</u>	<u>0.0 dBm</u>	<u>2 dBm</u>	<u>4 dBm</u>	<u>6 dBm</u>	<u>8 dBm</u>	<u>10 dBm</u>
13,0	3,47E-02	3,60E-02	3,87E-02	4,62E-02	6,74E-02	1,24E-01	2,28E-01
13,5	2,79E-02	2,91E-02	3,17E-02	3,91E-02	6,02E-02	1,18E-01	2,25E-01
14,0	2,20E-02	2,31E-02	2,56E-02	3,27E-02	5,36E-02	1,12E-01	2,23E-01
14,5	1,70E-02	1,80E-02	2,03E-02	2,70E-02	4,76E-02	1,07E-01	2,20E-01
15,0	1,28E-02	1,37E-02	1,58E-02	2,21E-02	4,22E-02	1,03E-01	2,18E-01
15,5	9,43E-03	1,03E-02	1,21E-02	1,79E-02	3,73E-02	9,81E-02	2,16E-01
16,0	6,78E-03	7,49E-03	9,13E-03	1,44E-02	3,29E-02	9,41E-02	2,14E-01
16,5	4,75E-03	5,34E-03	6,75E-03	1,14E-02	2,90E-02	9,03E-02	2,12E-01
17,0	3,24E-03	3,72E-03	4,90E-03	9,01E-03	2,57E-02	8,69E-02	2,11E-01
17,5	2,14E-03	2,53E-03	3,49E-03	7,05E-03	2,27E-02	8,38E-02	2,09E-01
18,0	1,38E-03	1,68E-03	2,45E-03	5,49E-03	2,01E-02	8,09E-02	2,08E-01
18,5	8,64E-04	1,09E-03	1,69E-03	4,25E-03	1,79E-02	7,83E-02	2,07E-01
19,0	5,25E-04	6,86E-04	1,14E-03	3,28E-03	1,59E-02	7,60E-02	2,06E-01
19,5	3,10E-04	4,24E-04	7,66E-04	2,53E-03	1,42E-02	7,38E-02	2,05E-01
20,0	1,78E-04	2,56E-04	5,07E-04	1,95E-03	1,28E-02	7,19E-02	2,04E-01
20,5	9,96E-05	1,52E-04	3,32E-04	1,50E-03	1,16E-02	7,02E-02	2,03E-01
21,0	5,43E-05	8,84E-05	2,16E-04	1,16E-03	1,05E-02	6,86E-02	2,02E-01
22,0	1,52E-05	2,87E-05	8,99E-05	7,06E-04	8,78E-03	6,60E-02	2,01E-01
23,0	3,96E-06	8,97E-06	3,75E-05	4,42E-04	7,51E-03	6,38E-02	2,00E-01

Nota: Resultados obtenidos del VPI enlace Punto Fijo – San Rafael de el Moján

Así mismo, la figura 25 ilustra gráficamente el comportamiento del BER bajo las condiciones actuales del enlace submarino analizado. En esta figura, se percibe con mayor claridad la tendencia decreciente del BER a medida que la relación señal a ruido incrementa, proporcionando una visualización más detallada del impacto del OSNR en la señal percibida.

Se evidencia que, a potencias de 8 dBm y 10 dBm, los niveles de errores alcanzan valores tan elevados que no pueden ser representados en el rango establecido en el eje Y de la figura en cuestión. Este comportamiento sugiere que, a dichas potencias, el sistema experimenta una alta degradación en la señal, provocando un aumento excesivo en la tasa de errores.

Adicionalmente, para potencia superiores a 2 dBm, no sería posible aplicar la técnica de FEC, debido a que los niveles de BER superan el mínimo umbral de errores aceptado, $1e^{-4}$, para aplicar los algoritmos de corrección de errores. Esto da a entender que la calidad de la señal es tan deficiente que inclusive los métodos de corrección de error más avanzados no serían capaces de mitigar y compensar el número de errores generados durante la transmisión, comprometiendo la fiabilidad del sistema.

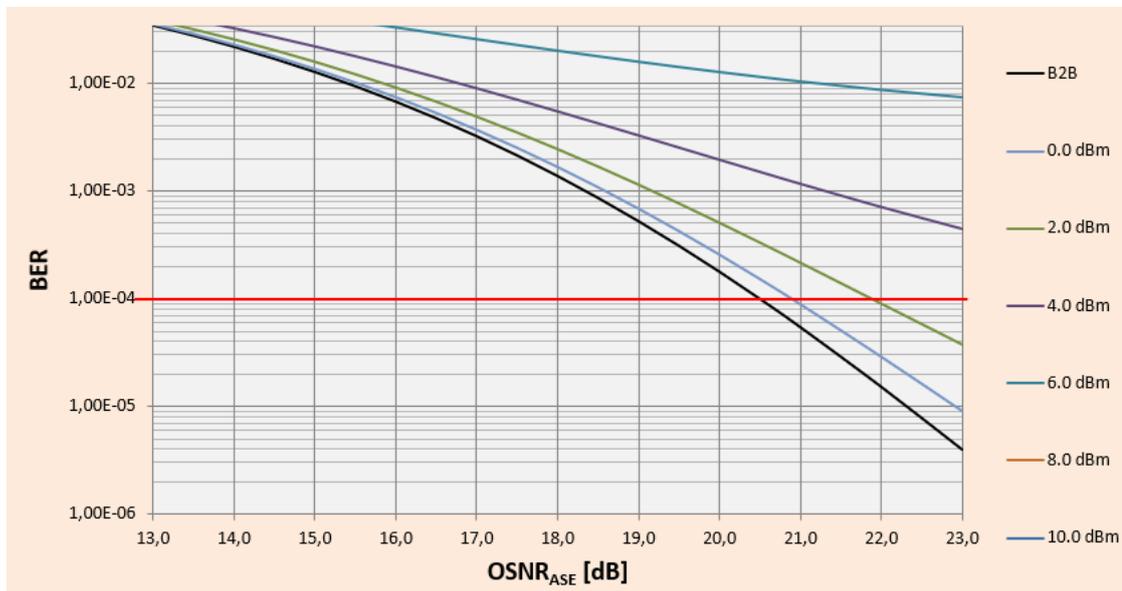


Figura 25: Gráfica BER vs OSNR de los datos de la tabla 7 para dos canales

También es posible establecer una relación directa entre el OSNR y el Factor Q gracias a los resultados numéricos obtenidos del BER. Cuando el Factor Q aumenta, conduce a una disminución en la tasa de errores mejorando sustancialmente el OSNR lo que indica que la señal se vuelve más dominante frente a la presencia de ruido. En la figura 26, se ilustra claramente esta relación, mostrando cómo el aumento del OSNR representa una mejora en el valor del Factor Q percibido. Ocurre un caso similar al anterior en lo que respecta a los niveles de potencia. Cuando la potencia por canal aumenta, tanto el Factor Q como el OSNR disminuye, tal como se mencionó anteriormente. A medida que el Factor Q disminuye, la separación entre los niveles de señal y ruido se reducen, aumentando la tasa de errores. El comportamiento mencionado, resalta la importancia de gestionar adecuadamente la potencia de transmisión por

canal, debido a que, un desequilibrio puede comprometer la eficiencia y desempeño del enlace. En esta figura, el eje Y que representa el Factor Q se denomina Q^2 , una notación adoptada por simplicidad. Este cambio en la notación no afecta el significado del parámetro de desempeño. Para los equipos de transmisión, un factor Q determinante oscila alrededor de 7 dBQ para que la señal sea considerada óptima en cuanto a errores presentes en ella y puedan ser corregidos con el FEC, este valor está relacionado con un BER de orden 10^{-4} .

A medida que aumenta la potencia por canal, el OSNR necesario para alcanzar un valor de Factor Q igual a 7 dBQ también aumenta, debido a que la señal debe mantener una buena calidad para soportar todo el trayecto de fibra óptica. Esto se debe a la aparición de efectos no lineales y muestra la necesidad de controlar cuidadosamente los niveles de potencia porque el exceso de estos puede conllevar a limitar la capacidad máxima bajo la cual opera de forma efectiva el enlace.

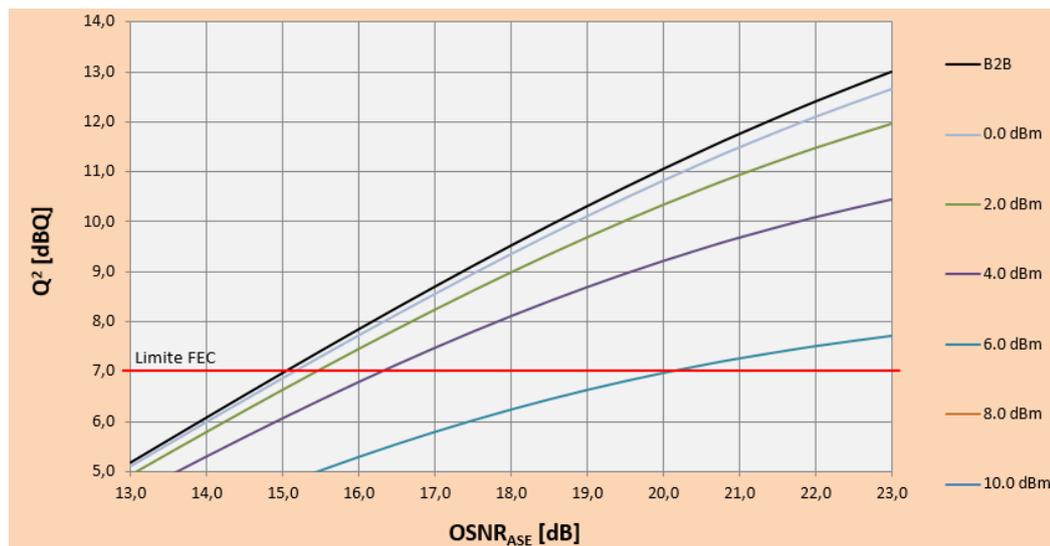


Figura 26: Gráfica factor Q vs OSNR tomado de los resultados arrojados por el VPI para distintas potencias de TX con dos canales activos

G. Simulación de efectos no lineales en un enlace con siete canales operativos

Los parámetros utilizados para analizar el comportamiento de siete canales bajo la influencia de efectos no lineales son similares a los empleados en la simulación anterior. En este caso, se observa que, al incrementar el número de canales sin un espaciado adecuado entre ellos, el FWM se intensifica limitando la expansión y capacidad de la red, afectando así mismo la calidad de la señal.

Las figuras 27, 28 y 29 ilustran la degradación progresiva de la señal conforme aumenta la potencia de transmisión, permitiendo observar cómo afecta el rendimiento en la recepción a través del espectro óptico y el diagrama de constelación del OSNR. Esta comparación facilita la evaluación del impacto de la potencia de las amplificadoras sobre la integridad de la señal que está siendo transmitida, con el fin de determinar la máxima capacidad alcanzable en el enlace teniendo como premisa el número de canales y la separación entre ellos. En este caso, la separación entre los canales es de 100GHz porque se están empleando canales consecutivos.

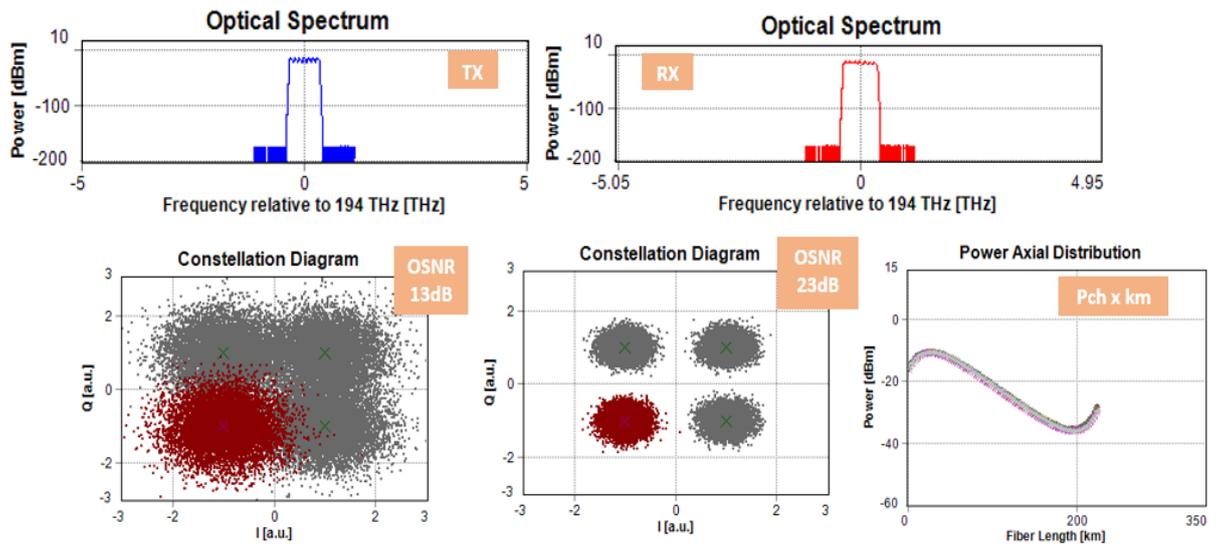


Figura 27: Resultados a una potencia Back-to-Back de -15 dBm para siete canales

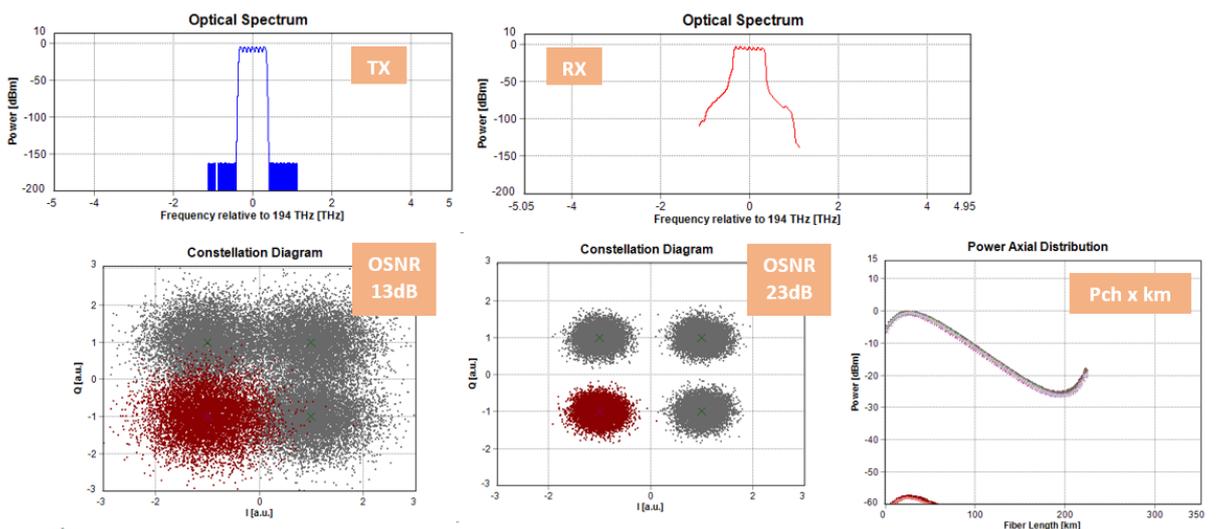


Figura 28: Resultados a una P_{ch} de -5 dBm para siete canales

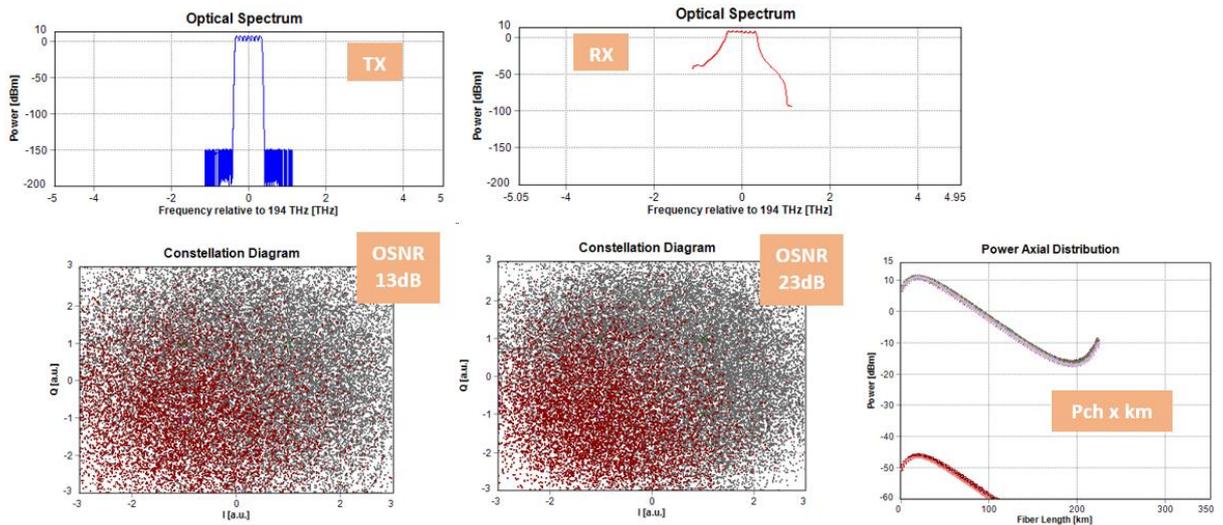


Figura 29: Resultados a una P_{ch} de 8 dBm para siete canales

Al comparar las figuras 25 y 30, se observa que, al pasar de dos a siete canales, se produce una degradación significativa en el OSNR alcanzado a medida que aumenta la potencia por canal. Este comportamiento sugiere que, a mayor cantidad de canales en el enlace, los efectos no lineales se intensifican, afectando negativamente el OSNR y, en consecuencia, limitando el crecimiento de la capacidad ya que esta depende directamente de la relación señal a ruido disponible en el tramo. La figura 31, respalda lo expuesto anteriormente, al mostrar la relación entre el OSNR y el Factor Q, este último parámetro es crucial para lograr mejorar las capacidades existentes en uno o varios enlaces.

Las figuras 30 y 31 muestran que, para potencias superiores a -3 dBm, sería sumamente complicado mejorar el rendimiento de los canales existentes a través del aumento de sus capacidades o tasas de modulación. A estos niveles de potencia, los parámetros BER y Factor Q presentan una alta limitación impidiendo una adecuada optimización.

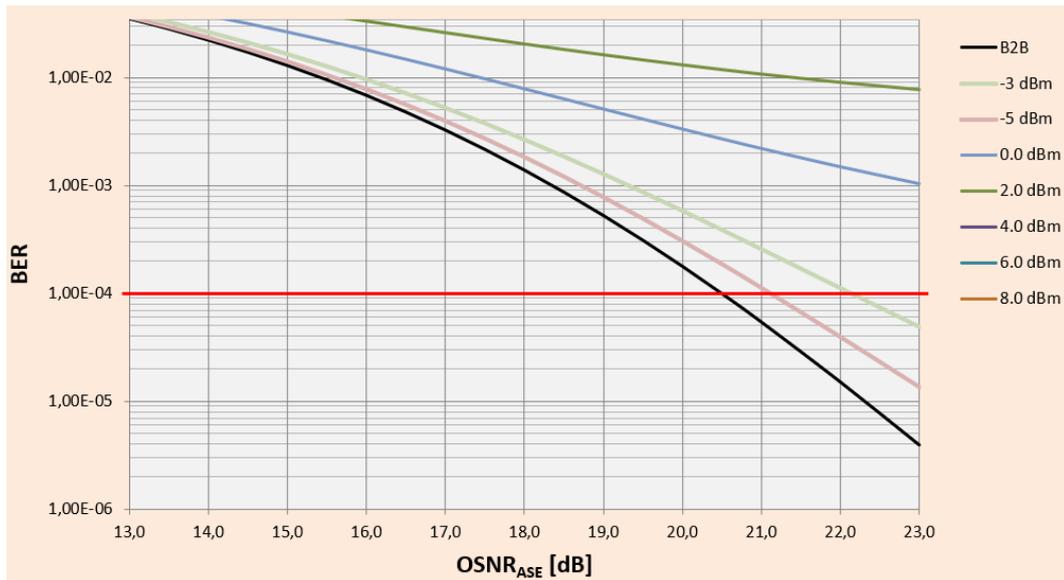


Figura 30: OSNR vs BER para un enlace de siete canales

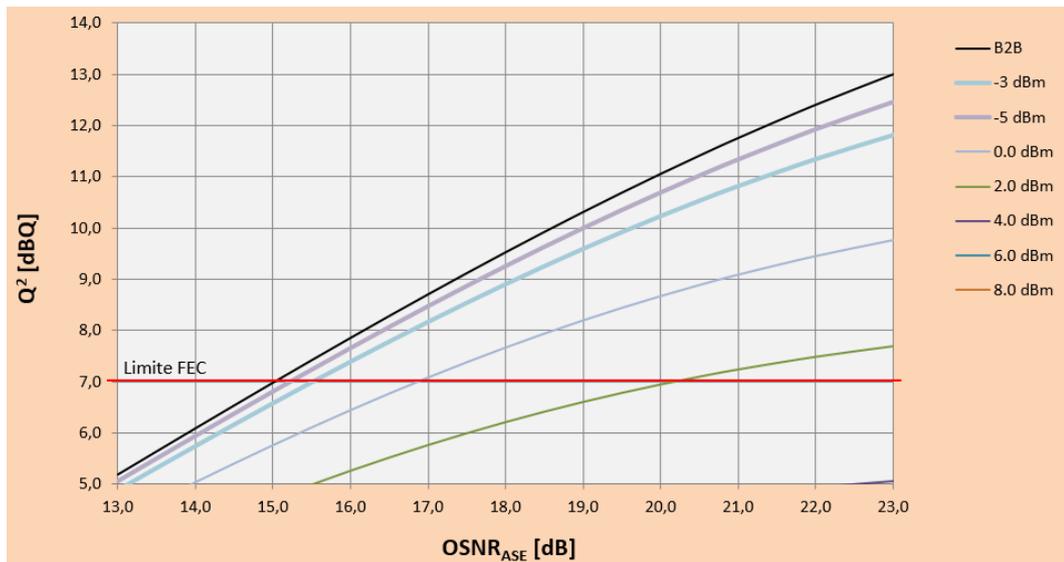


Figura 31: OSNR vs Factor Q para un enlace de siete canales

H. OSNR necesario para el mínimo valor del Factor Q aceptable a partir de los resultados de simulación.

Teniendo en cuenta las figuras 26 y 31, en la tabla 9 se presenta una diferencia entre el OSNR necesario para alcanzar un Factor Q igual a 7 dBQ de acuerdo con los canales simulados en el enlace, y la potencia por canal que está siendo transmitida por las amplificadoras. Este Factor Q corresponde al mínimo valor necesario para que el FEC pueda corregir los errores contenidos en la recepción de la señal en las tarjetas transponder, como se ha mencionado anteriormente,

Se evidencia que a medida que se incrementa el número de canales, para una misma potencia de transmisión, el OSNR cada vez es más exigente para poder conservar buenos niveles de señal a lo largo del enlace. Para la columna de siete canales, el OSNR para potencias de 4 y 6 dBm no está disponible, porque supera el rango de los gráficos empleados.

Tabla 9: Diferencia de OSNR acorde a la potencia de transmisión para un Factor Q = 7 dBQ

Factor Q = 7 dBQ	<u>2 canales</u>	<u>7 canales</u>	<u>$\Delta OSNR$</u>
$P_{TX} = 0 \text{ dBm}$	15.2	16.8	1.6
$P_{TX} = 2 \text{ dBm}$	15.5	20.2	4.7
$P_{TX} = 4 \text{ dBm}$	16.3	-	-
$P_{TX} = 6 \text{ dBm}$	17.5	-	-

Nota: Valor de OSNR para garantizar un factor Q igual a 7 dBQ dependiendo los canales simulados

VIII. Conclusiones

Comprender y evaluar el impacto de los efectos no lineales es de gran importancia para determinar la máxima capacidad que puede alcanzar un sistema de comunicación dado, debido a que estos efectos pueden conllevar a una limitación en la calidad y en el alcance de la señal transmitida, en especial cuando se trata de sistemas de alta capacidad como las soluciones DWDM. Las propiedades específicas de cada tipo de fibra óptica, como la dispersión, la atenuación y la susceptibilidad a fenómenos no lineales como FWM, SPM y XPM, hacen que el comportamiento del enlace varíe dependiendo de la fibra utilizada. Por esta razón, resulta fundamental la simulación del comportamiento del enlace, puesto que contribuye a la predicción del rendimiento total y facilitan la identificación de puntos de mejora, ayudando a optimizar el diseño y la máxima capacidad de transmisión del sistema.

Para mitigar la aparición de los efectos no lineales, es fundamental disminuir la potencia de transmisión por canal a un máximo de 5 dBm, evitando que las amplificadoras transmitan con niveles de potencias muy altos. Adicionalmente, se debe tener en cuenta otros factores como el espaciamiento óptimo entre los canales para minimizar el impacto del FWM y XPM, y utilizar tasas y formatos de modulación inferiores

Así mismo, el cálculo de la capacidad de una red de transporte existente bajo condiciones no lineales representa un desafío para optimizar el diseño y el rendimiento del sistema. Mediante la simulación de la red, es posible recopilar datos detallados que faciliten la evaluación del comportamiento de la señal y su interacción con los efectos no lineales a medida que varía el estado de los enlaces. Este análisis permite identificar los ajustes necesarios para mejorar la capacidad implementada como la potencia de transmisión y otros factores involucrados.

En cuanto a la medición de la calidad de la señal, los resultados de las simulaciones indican que el OSNR por sí solo no es un parámetro suficiente a través del cual se evalúe el rendimiento real de la red, más que todo en escenarios de altas potencias donde las no linealidades comienzan a dominar la señal transmitida. Esto se debe principalmente a que el OSNR solo refleja el impacto de los amplificadores EDFA sobre la señal de interés mas no tiene en cuenta el papel que desempeñan los efectos no lineales. Por tanto, parámetros como el ESNR, GOSNR y Factor Q, adquieren mayor relevancia a la hora de tomar decisiones respecto al posible crecimiento de la capacidad del sistema, dado que proporcionan una visión más completa sobre cómo las NL afectan su rendimiento global.

PRACTICANTE: Mariana Noreña Vásquez

ASESORES: Ana María Cárdenas Soto – Hernán Darío Yepes

PROGRAMA: Ingeniería de Telecomunicaciones

Semestre de la práctica: 2024-2



Introducción

Bajo un escenario de creciente demanda de tráfico en las redes de telecomunicaciones, optimizar la cantidad de información que se puede transportar sobre una infraestructura existente se convierte en un factor decisivo para el modelo de negocios y la continuidad de la compañía dueña de la infraestructura. Hace dos décadas, se tomaron decisiones sobre la selección del tipo de fibra considerando únicamente las limitaciones de la tecnología de la época, lo que actualmente está limitando el aumento de las capacidades de las redes de nueva generación.

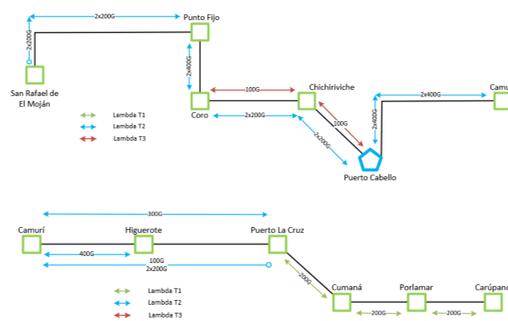


Metodología

- ✓ Extraer la topología y los elementos que componen el enlace



- ✓ Determinar la capacidad total bajo condiciones actuales



- ✓ Identificar qué mejoras se pueden realizar para aumentar la capacidad total permitida

Ver sección de resultados

- ✓ Calcular la nueva capacidad alcanzable luego de mejorar el sistema

Ver sección de resultados

- ✓ Inversión total para optimizar la red

Producto	PRECIO UNITARIO (USD)	Punto fijo	Coro	Chichiriviche	Camurí	Higuero	Pto. La Cruz	Cumana	Porlamar	Caripano	Puerto Cabello	TOTAL	PRECIO TOTAL (USD)
Muxponder Standalone 100G-600G	35.000	1	1	2	1						1	6	210.000,00
Muxponder Dual 100G+	15.000		1	2		1	2	2	1	1	1	10	150.000,00

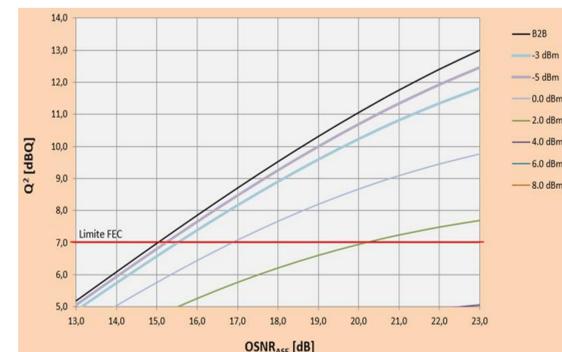
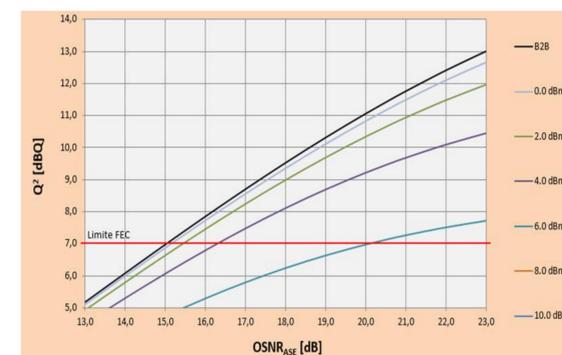
- ✓ Impacto de los efectos no lineales

Ver sección de resultados



Resultados

Los resultados obtenidos muestran que, para aumentar la capacidad de los canales con las condiciones actuales de la red, es necesario considerar una inversión para optimizar la infraestructura. Para ello, es esencial evaluar el comportamiento del sistema a medida que la potencia por canal es ajustada tomando como referencia un valor determinado de Factor Q.



Conclusiones

- ✓ A medida que se incrementa la potencia por canal, los efectos no lineales impactan negativamente la calidad de la señal, limitando la expansión de la red.
- ✓ La simulación de la red permite identificar los ajustes necesarios para mejorar la capacidad en una red de transporte existente tales como la potencia de transmisión y otros factores involucrados.
- ✓ El OSNR no es un parámetro suficiente a través del cual se logre reflejar el comportamiento real de la red en escenarios de alta potencia. Por tanto, parámetros como ESNR, GOSNR y Factor Q, adquieren un papel mayor a la hora de tomar decisiones frente al posible crecimiento de la red.



Objetivos

- ✓ Recopilar información sobre el estado actual de la red.
- ✓ Elaborar el cálculo de la capacidad total alcanzada bajo condiciones actuales del cable teniendo en cuenta OSNR, Factor Q y calibración de la red.
- ✓ Estimar la capacidad objetiva futura que se puede alcanzar mediante la identificación de puntos de mejora.
- ✓ Calcular la inversión total que se necesitaría para lograr la capacidad objetivo

VIII. Conclusiones

Comprender y evaluar el impacto de los efectos no lineales es de gran importancia para determinar la máxima capacidad que puede alcanzar un sistema de comunicación dado, debido a que estos efectos pueden conllevar a una limitación en la calidad y en el alcance de la señal transmitida, en especial cuando se trata de sistemas de alta capacidad como las soluciones DWDM. Las propiedades específicas de cada tipo de fibra óptica, como la dispersión, la atenuación y la susceptibilidad a fenómenos no lineales como FWM, SPM y XPM, hacen que el comportamiento del enlace varíe dependiendo de la fibra utilizada. Por esta razón, resulta fundamental la simulación del comportamiento del enlace, puesto que contribuye a la predicción del rendimiento total y facilitan la identificación de puntos de mejora, ayudando a optimizar el diseño y la máxima capacidad de transmisión del sistema.

Para mitigar la aparición de los efectos no lineales, es fundamental disminuir la potencia de transmisión por canal a un máximo de 5 dBm, evitando que las amplificadoras transmitan con niveles de potencias muy altos. Adicionalmente, se debe tener en cuenta otros factores como el espaciamiento óptimo entre los canales para minimizar el impacto del FWM y XPM, y utilizar tasas y formatos de modulación inferiores

Así mismo, el cálculo de la capacidad de una red de transporte existente bajo condiciones no lineales representa un desafío para optimizar el diseño y el rendimiento del sistema. Mediante la simulación de la red, es posible recopilar datos detallados que faciliten la evaluación del comportamiento de la señal y su interacción con los efectos no lineales a medida que varía el estado de los enlaces. Este análisis permite identificar los ajustes necesarios para mejorar la capacidad implementada como la potencia de transmisión y otros factores involucrados.

En cuanto a la medición de la calidad de la señal, los resultados de las simulaciones indican que el OSNR por sí solo no es un parámetro suficiente a través del cual se evalúe el rendimiento real de la red, más que todo en escenarios de altas potencias donde las no linealidades comienzan a dominar la señal transmitida. Esto se debe principalmente a que el OSNR solo refleja el impacto de los amplificadores EDFA sobre la señal de interés mas no tiene en cuenta el papel que desempeñan los efectos no lineales. Por tanto, parámetros como el ESNR, GOSNR y Factor Q, adquieren mayor relevancia a la hora de tomar decisiones respecto al posible crecimiento de la capacidad del sistema, dado que proporcionan una visión más completa sobre cómo las NL afectan su rendimiento global.

IX. Referencias Bibliográficas

- [1] C. Papapavlou, K. Paximadis, D. Uzunidis y I. Tomkos. “Toward sdm-based submarine optical networks: A review of their evolution and upcoming trends”. MDPI. Accedido el 13 de julio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/telecom3020015>
- [2] Swinhoe, D. (2021, 24 de septiembre). ¿Qué es un cable submarino? Explicación de la fibra submarina. DCD. <https://www.datacenterdynamics.com/es/features/qué-es-un-cable-submarino-explicación-de-la-fibra-submarina/>
- [3] “Padtec S.A”. Padtec. Accedido el 4 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.padtec.com.br/>
- [4] “Historia de la fibra óptica (i): orígenes”. El Blog de Promax. Accedido el 19 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://blogdepromax.wordpress.com/2013/12/20/historia-de-la-fibra-optica-i-origenes/>
- [5] C. Garcia y Adrián Emmanuel. “Fibra óptica: evolución, estándares y aplicaciones.” Repositorio institucional uqroo. Accedido el 20 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/20.500.12249/2610>
- [6] Joshelu. “Especial Comunicaciones ópticas (II): Qué es una fibra óptica y cómo funciona”. Xataka Móvil - Teléfonos móviles, tarifas, operadores de telefonía. Accedido el 1 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.xatakamovil.com/conectividad/especial-comunicaciones-opticas-ii-que-es-una-fibra-optica-y-como-funciona>
- [7] I. A. Vargas. “Sistemas de fibra - optica”. Scribd. Accedido el 1 de junio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.scribd.com/doc/190996361/SISTEMAS-DE-FIBRA-OPTICA-Ibrahim-Alonso-Vargas-pdf>
- [8] “Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM | Revista Facultad de Ingeniería”. Portal de revistas uptc. Accedido el 25 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible: <https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/1420/1415>
- [9] E. Rodríguez. “Historias de Telefónica: El cable submarino”. Movistar blog. Accedido el 30 de julio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.movistar.es/blog/home/cable-submarino-que-es-historia-componentes/>
- [10] López César, I. (2020, 9 de abril). Un cable submarino para conectar Europa y América. historia.nationalgeographic.com.es. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/cable-submarino-para-conectar-europa-y-america_15073

- [11] S. H. Zevallos León, “Operación y mantenimiento de una red de cable submarino”, Trabajo de grado, Pontif. Univ. Catol. Del Peru, Lima, Perú, 2008. Accedido el 20 de julio de 2024. [En línea]. Disponible: https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/1053/ZEVALLLOS_LEON_SANTIAGO_MANTENIMIENTO_RED_CABLE_SUBMARINO.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [12] M. Tinka. “Spatial Division Multiplexing — a new (subsea) cable paradigm | APNIC Blog”. APNIC Blog. Accedido el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://blog.apnic.net/2023/05/02/spatial-division-multiplexing-a-new-subsea-cable-paradigm/>
- [13] “Submarine cable map”. Submarine Cable Map. Accedido el 14 de julio de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.submarinecablemap.com/>
- [14] “ITU-T recommendations”. ITU. Accedido el 4 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/index.aspx?ser=G>
- [15] J.-S. Tassé. “Capitalizing on existing fiber network’s potential with an OSA”. Network test, monitoring and analytics experts | EXFO. Accedido el 11 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.exfo.com/es/recursos/blog/capitalizing-existing-fiber-networks/>
- [16] Transverse compatible dense wavelength division multiplexing applications for repeatered optical fibre submarine cable systems, G.977.1, ITU-T, Geneva, Suiza, 2020.
- [17] E. Rivera Hartling et al., "Design, Acceptance and Capacity of Subsea Open Cables," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 3, pp. 742-756, 1 Feb.1, 2021, doi: 10.1109/JLT.2020.3045389.
- [18] P. Poggiolini, G. Bosco, A. Carena, V. Curri, Y. Jiang and F. Forghieri, "The GN-Model of Fiber Non-Linear Propagation and its Applications," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 4, pp. 694-721, Feb.15, 2014, doi: 10.1109/JLT.2013.2295208.
- [19] M. Shtaif, C. Antonelli, A. Mecozzi y X. Chen. “Challenges in Estimating the Information Capacity of the Fiber-Optic Channel”. IEEE explore. Accedido el 27 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9866733>
- [20] ITU-T G-series Recommendations – Supplement 39, ITU-T, Geneva, Suiza, 2016.
- [21] VPIphotonics. “VPIphotonics Design Automation”. VPIphotonics: Simulation Software and Design Services. Accedido el 15 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.vpiphotonics.com/Tools/OpticalSystems/>

[22] E. Grellier y A. Bononi. “Quality parameter for coherent transmissions with Gaussian-distributed nonlinear noise”. Optica Publishing Group. Accedido el 14 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1364/OE.19.012781>

[23] E. London, A. D’Amico, V. Curri, E. Virgillito y A. Napoli. “Modelling non-linear interference in non-periodic and disaggregated optical network segments”. Optica Publishing Group. Accedido el 14 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1364/OPTCON.453253>

X. Anexos

A. Anexo 1: Resultados de la simulación de efectos no lineales en un enlace de dos canales

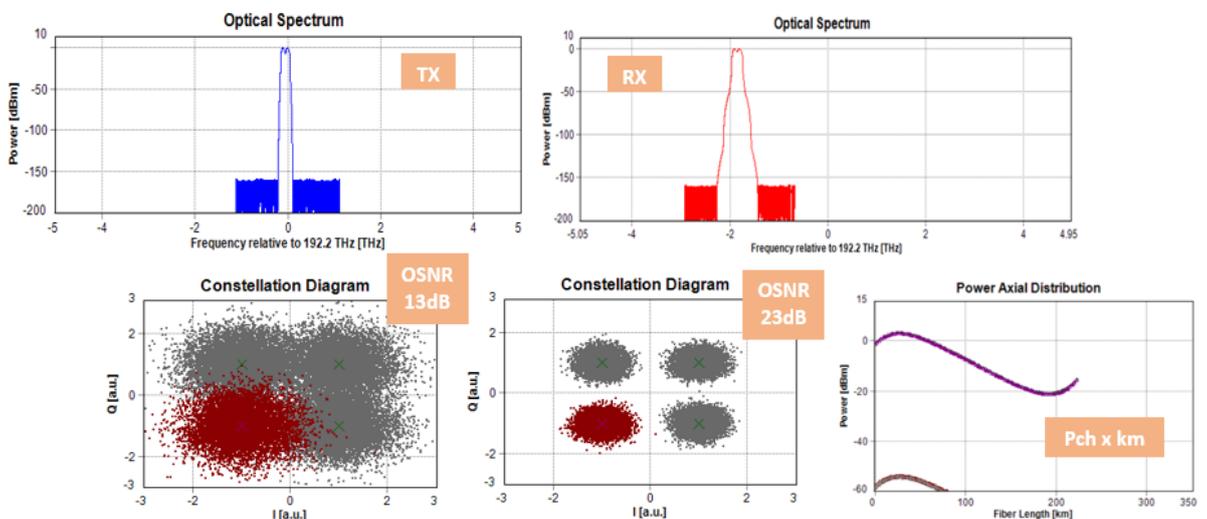


Figura 32: Resultados para dos canales con P_{ch} de 0 dBm en un enlace de 223 km

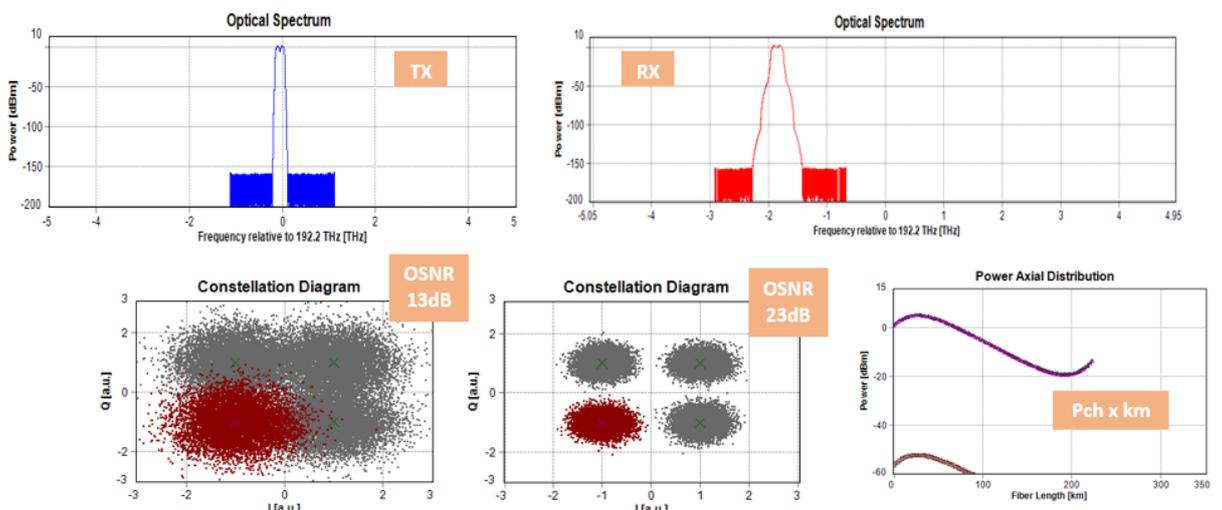


Figura 33: Resultados para dos canales con P_{ch} de 2 dBm en un enlace de 223 km

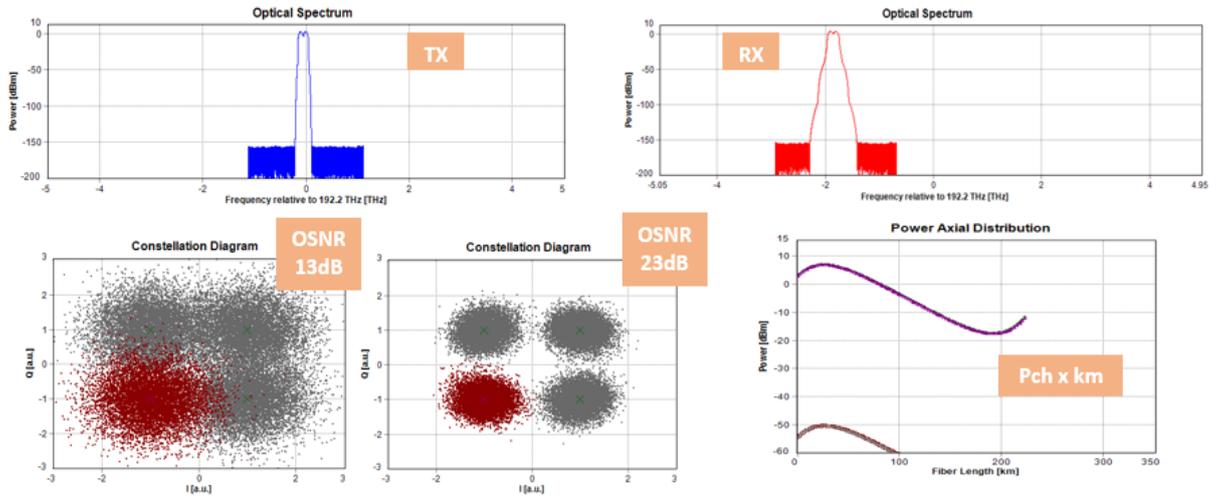


Figura 34: Resultados para dos canales con P_{ch} de 4 dBm en un enlace de 223 km

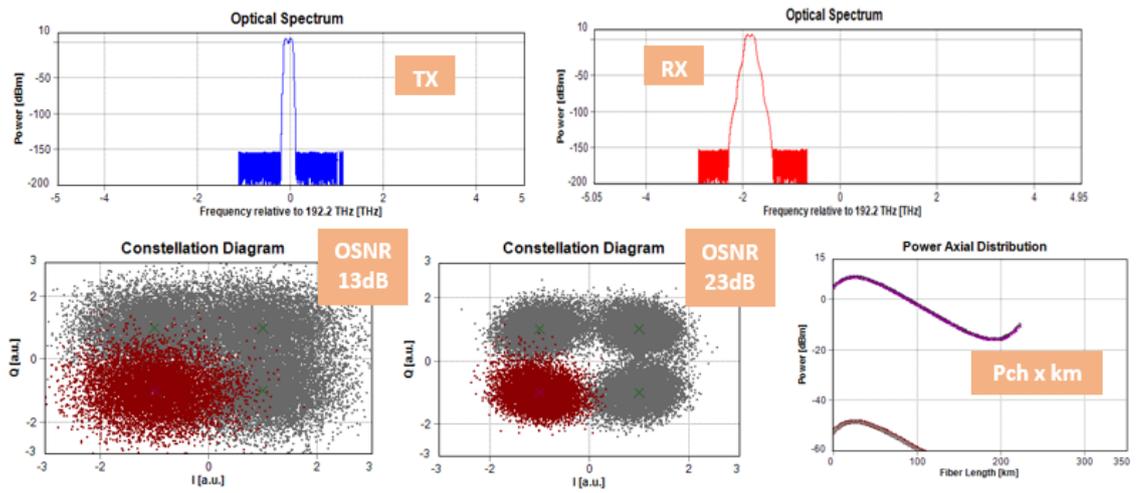


Figura 35: Resultados para dos canales con P_{ch} de 6 dBm en un enlace de 223 km

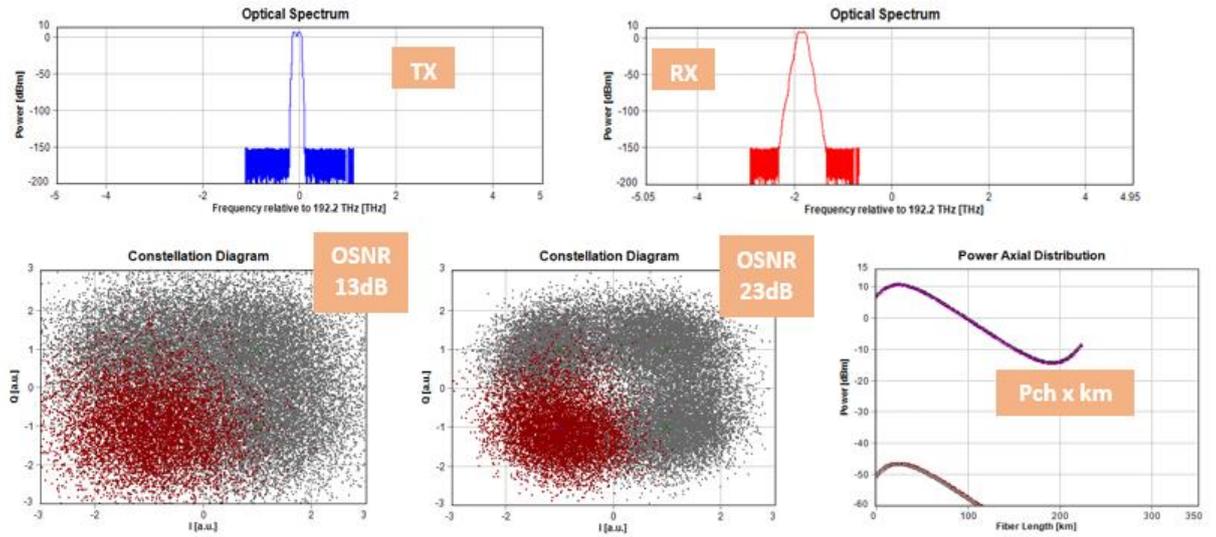


Figura 36: Resultados para dos canales con P_{ch} de 8 dBm en un enlace de 223 km

B. Anexo 2: Resultados de la simulación de efectos no lineales en un enlace con siete canales

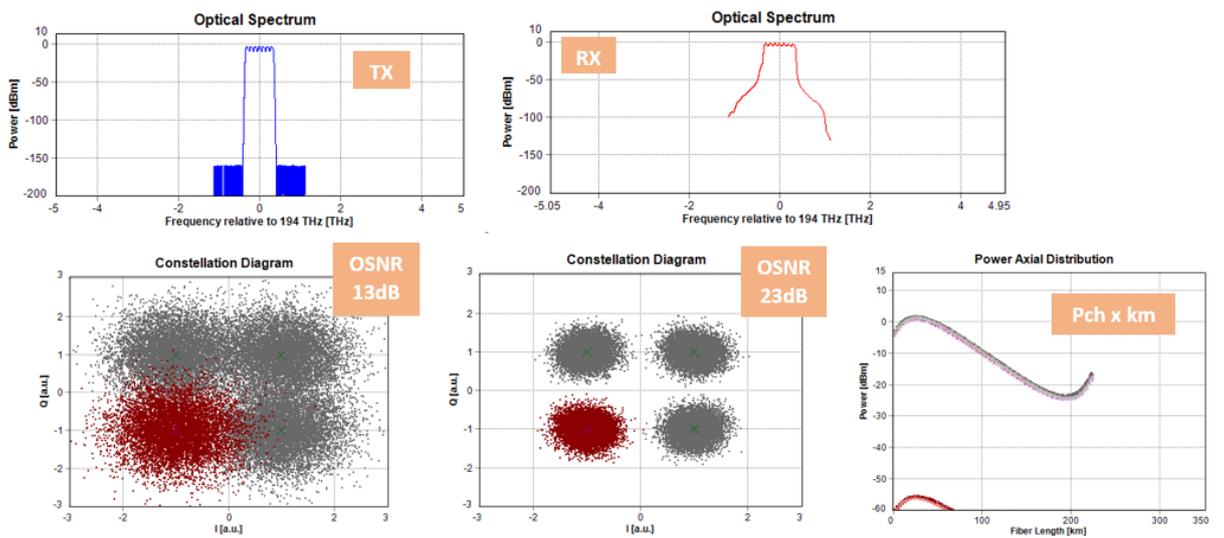


Figura 37: Resultados para dos canales con P_{ch} de -3 dBm en un enlace de 223 km

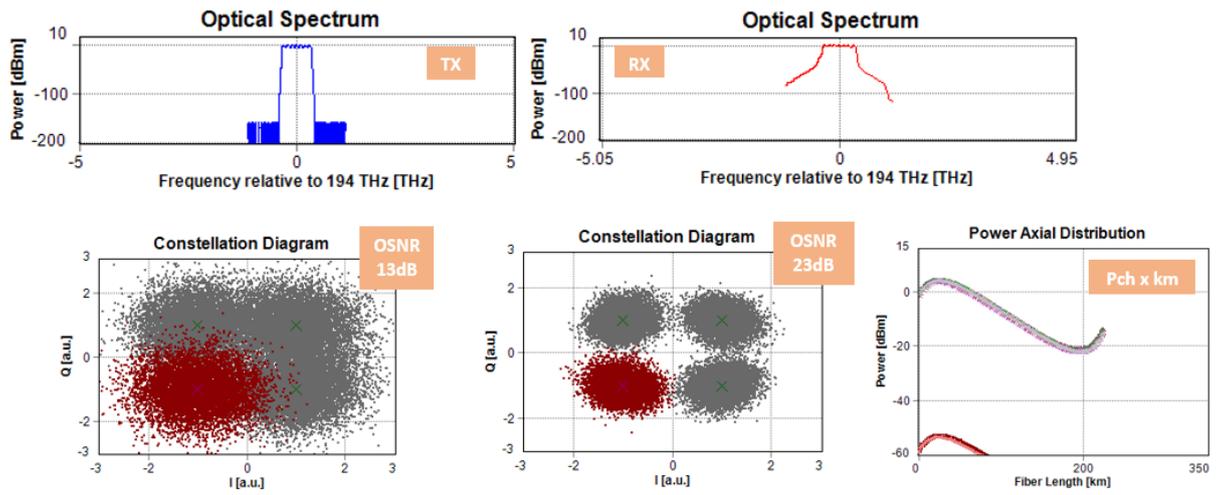


Figura 38: Resultados para dos canales con P_{ch} de 0 dBm en un enlace de 223 km

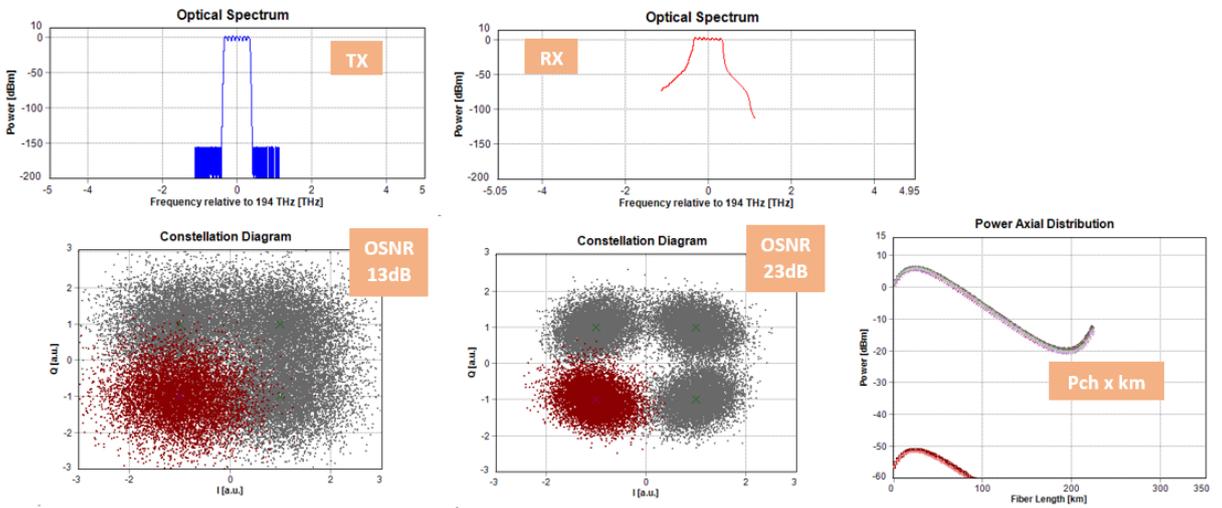


Figura 39: Resultados para dos canales con P_{ch} de 2 dBm en un enlace de 223 km

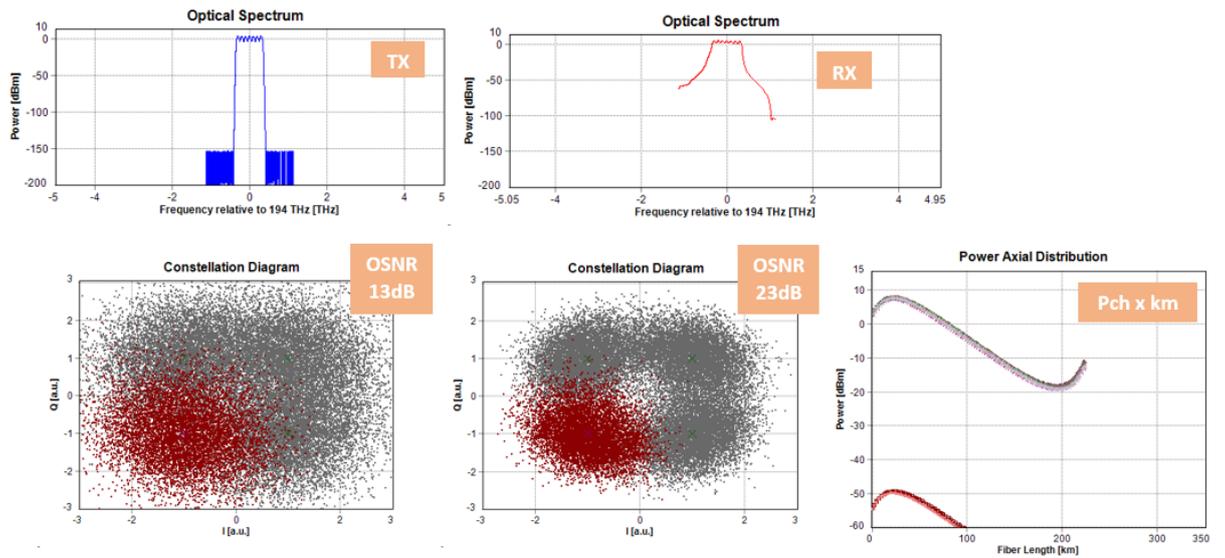


Figura 40: Resultados para dos canales con P_{ch} de 4 dBm en un enlace de 223 km

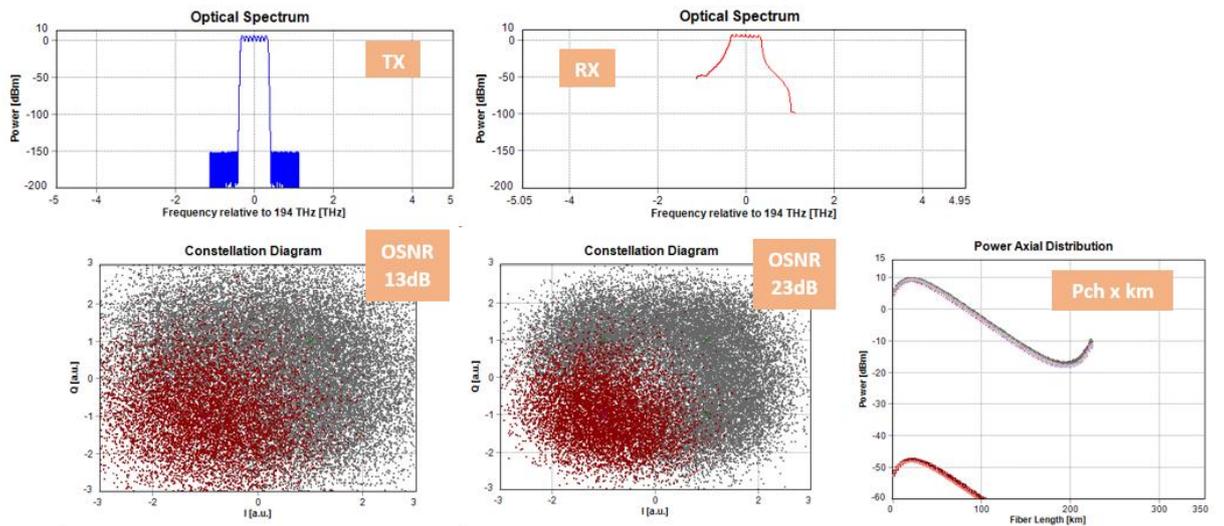


Figura 41: Resultados para dos canales con P_{ch} de 6 dBm en un enlace de 223 km

C. Anexo 3: Comparación entre el número de canales operativos y el OSNR necesario para alcanzar un determinado valor de Factor Q

Tabla 10: Diferencia de OSNR acorde a la potencia de transmisión para un Factor Q = 7.5 dBQ

<u>Factor Q = 7.5 dBQ</u>	<u>2 canales</u>	<u>7 canales</u>	<u>ΔOSNR</u>
$P_{TX} = 0 \text{ dBm}$	15,8	18	2,2
$P_{TX} = 2 \text{ dBm}$	16,3	23	6,7
$P_{TX} = 4 \text{ dBm}$	17,5	-	-
$P_{TX} = 6 \text{ dBm}$	23	-	-

Nota: Valores de OSNR para garantizar un factor Q igual a 7.5 dBQ en las transponder

Tabla 11: Diferencia de OSNR acorde a la potencia de transmisión para un Factor Q = 8 dBQ

<u>Factor Q = 8 dBQ</u>	<u>2 canales</u>	<u>7 canales</u>	<u>$\Delta OSNR$</u>
$P_{TX} = 0 \text{ dBm}$	16,3	18,7	2,4
$P_{TX} = 2 \text{ dBm}$	16,7	-	-
$P_{TX} = 4 \text{ dBm}$	17,8	-	-
$P_{TX} = 6 \text{ dBm}$	-	-	-

Nota: Valores de OSNR para garantizar un factor Q igual a 8 dBQ en las transponder